

Examensarbete 2005:40

Kemisk fosforrening på Ryaverket – en utvärdering med hjälp av faktorförsök på två nivåer

Lisa Ahlström och Magnus Persson

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Vatten Miljö Teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2005

Kemisk fosforering på Ryaverket – en utvärdering med hjälp av faktorförsök på två nivåer
LISA AHLSTRÖM OCH MAGNUS PERSSON

©LISA AHLSTRÖM OCH MAGNUS PERSSON, 2005

Examensarbete 2005:40

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Vatten Miljö Teknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Chalmers reproservice / Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2005

Sammanfattning

Denna rapport är en studie av kemisk fosforrening av avloppsvatten på Ryaverket i Göteborg. Under år 2005 skärptes kraven på fosforreningen till 0,40 mg P/l och fr.o.m. år 2007 kommer kraven att skärpas ytterligare. För Ryaverket är de nya kraven en stor utmaning och för att kunna förbättra reningen på verket behöver kunskaperna kring reningsprocessen öka. Syftet med denna rapport är studera några av de faktorer som påverkar reningen av fosfor. De olika faktorernas inverkan studerades med hjälp av faktorförsök på två nivåer. Fyra parametrar; pH, syre, sulfid och kalcium, testades i bägarförsök och deras inverkan på reningsprocessen utvärderades utifrån halterna av fosfat, total fosfor, suspenderat material (SS) och Fe (tot.) i det behandlade vattnet, mätt i både ofiltrerade och filtrerade prov. Mätresultaten analyserades med en statistisk beräkningsmetod där effekter för de enskilda parametrarna och kombinationer av parametrar beräknades. Effektens signifikans bedömdes analytiskt och grafiskt.

Resultaten visade att sulfid har en signifikant effekt på avskiljningen av SS där en låg sulfidnivå ger en bättre avskiljning. Effekten av pH var att ett högt pH gav en bättre avskiljning av SS. En hög pH-nivå resulterade även i att mindre järn fanns kvar i det behandlade vattnet. pH hade i kombination med syre en betydande effekt på reningen av fosfat och totalfosfor (filtrerade prover) där en hög pH-nivå samtidigt med en hög nivå av syre gav bäst rening. Kombinationen av sulfid och pH påverkade också reningen av fosfat och totalfosfor (filtrerade och ofiltrerade prover). Bäst resultat uppnåddes vid en hög pH-nivå i kombination med en låg sulfidnivå. Avslutningsvis hade kalcium i kombination med sulfid inverkan på reningen av totalfosfor (ofiltrerade prover) där bäst rening uppnåddes vid en hög kalciumnivå och en låg sulfidnivå.

Nyckelord: Kemisk fosforrening, faktorförsök, effektberäkning, signifikans, interaktion, järnsulfat.

Chemical Phosphorous Removal at the Rya Wastewater Treatment Plant
– Evaluation by factorial design at two levels
LISA AHLSTRÖM
MAGNUS PERSSON
Department of Civil and Environmental Engineering
Chalmers University of Technology

Abstract

The purpose of this thesis project is to study the chemical phosphorus removal at the Rya Wastewater Treatment Plant in Gothenburg. The effluent discharge limit of phosphorus today is set at 0.4 mg P/l and in 2007 it will be further reduced to 0.3 mg P/l. For the Rya WWTP these new limits will be a challenge to meet. In order to fulfil these requirements the knowledge about the treatment processes must be increased. The objective of this work is to investigate the impact of some wastewater variables on the phosphorus removal. Factorial design at two levels was used to plan jar tests in which the influence of four parameters: pH, oxygen, calcium and sulphide, was tested. The results were analysed statistically by determining the effect of not only the parameter itself, but also of combinations of parameters, on the treatment process. The significance of the calculated effect was thereafter determined. The results showed that sulphide has an effect on the removal of the suspended solids (SS), where a low sulphide level led to a better removal. A better removal of SS was obtained at a high level of pH. Besides, a high level of pH also reduced the amount of iron in the treated water. The pH interacted with oxygen where a high level of pH in combination with a high level of oxygen significantly reduced the amount of phosphate and total phosphorus (filtrated samples). The combination of sulphide and pH also affected the removal of phosphate and total phosphorus (filtrated and non filtrated samples). The best results were achieved with a high level of pH and a low level of sulphide. Finally, calcium in combination with sulphide had an effect on the removal of total phosphorus (non filtrated); the best removal was attained with a high level of calcium and a low level of sulphide. The report is written in Swedish.

Keywords: Chemical phosphorus precipitation, factorial design, effect, significance, interaction, iron sulphate

Förord

Denna rapport är ett examensarbete vid institutionen för Vatten Miljö och Transport på Chalmers tekniska högskola. Examensarbetet är ett obligatoriskt moment om 20 p i civilingenjörsutbildningen på Chalmers.

Detta projekt hade inte kunnat genomföras utan hjälp från följande personer. Först och främst vår handledare Britt-Marie Wilén på institutionen för Vatten Miljö Transport som alltid varit hjälpsam och tillmötesgående. Vi skulle även vilja tacka Mona Pålsson och Jesper Knutsson som har besvarat alla våra frågor i laboratoriet. Vi vill även tacka Ryaverket för att vi fick genomföra detta projektet och även all personal på institutionen för Vatten Miljö Transport för en trevlig tid.

Göteborg 2005-04-12

Lisa Ahlström
Magnus Persson

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Abstract	iii
Förord	v
1. Inledning	1
1.1 Syfte och Metod	4
2. Fosfor i avloppsvattnet	5
2.1 Löst fosfor	5
2.2 Kolloider	7
3. Kemisk fosforrening	11
3.1 Fällning	11
3.2 Koagulering	13
3.3 Flockning och separering	14
4. Undersökningsmetod	15
4.1 Faktorförsök	15
4.2 Tidigare undersökning	16
4.3 Framtagning av parametrar	17
4.3.1 pH	17
4.3.2 Löst syre	19
4.3.3 EDTA	20
4.3.4 Humus	22
4.3.5 Kalcium	22
4.3.6 Sulfid	23
4.4 Sammanställning av parametrar	24
5. Laborationer	25
5.1 Genomförande	25
5.2 Utförda mätningar	27
6. Analys	29
6.1 Beräkning av effekter	29
6.2 Analytisk tolkning av effekter	31
6.3 Grafisk tolkning av effekter	33
6.4 Interaktion mellan parametrar	34
6.5 Analys av pH	35
7. Resultat och diskussion	37
7.1 SS	38
7.2 Fosfat	40
7.3 Totalfosfor, filtrerat	42
7.4 Totalfosfor, ofiltrerat	44
7.5 Totaljärn	47
7.6 pH	52
7.7 Diskussion	55
8. Slutsatser	57
9. Referenser	59

Appendix 1	pH Försök
Appendix 2	Försök av koncentration av löst syre
Appendix 3	EDTA försök
Appendix 4	Humus försök
Appendix 5	Kalcium försök
Appendix 6	Sulfid försök
Appendix 7	Blandning av järnsulfatlösning
Appendix 8	Mätning av totalfosfor
Appendix 9	Bestämning av Fe (II) och Fe (tot.)
Appendix 10	Sammanställning av försök
Appendix 11	Teckentabell

1. Inledning

Fosfor är ett livsviktigt ämne i alla levande organismer eftersom det är en viktig beståndsdel i energiöverförande molekyler, DNA och i våra nerver (Williams 2001). Tillgången på fosfor i hav och sjö avgör till stor del tillväxten av växter och planktonalger. Stora utsläpp av fosfor kan därför resultera i övergödning. Vid övergödning tättnar växtligheten längs stränder, planktonalger uppträder allt rikligare och döda växter och djur ansamlas i ett allt tjockare sedimentlager på botten. Sjöar och vikar blir grundare och den fria vattenytan minskar (Karlsson *et al.* 1994).

Den fosfor som återfinns i avloppsvatten härstammar från fekalier, urin och tvättmedel. Om ett obehandlat avloppsvatten skulle släppas ut i hav och sjöar skulle det i hög grad bidra till övergödning. För Ryaverket i Göteborg, vars reningsprocess står i fokus i denna rapport, ställs kravet att från och med år 2005 får utsläppen av totalfosfor inte överstiga 0,40 mg P/l. Kravet gäller som riktvärde på kvartalsbasis samt som gränsvärde på årsbasis. Från och med år 2007 kommer kraven att skärpas till 0,30 mg P/l (Gryaabs miljörapport 2003).

För Ryaverket är de nya kraven en stor utmaning. Utsläppet av fosfor från verket varierar stort under året, se diagram 1. Innan 2005 fick inte gränsvärdet överskridas på årsbasis men nu ställs även krav på att riktvärdet måste hållas under alla kvartal på året. Under år 2004 släpptes i medeltal 0,35 mg P/l ut under året men med variationerna i åtanke är det inte säkert att kraven uppfylls på kvartalsbasis.

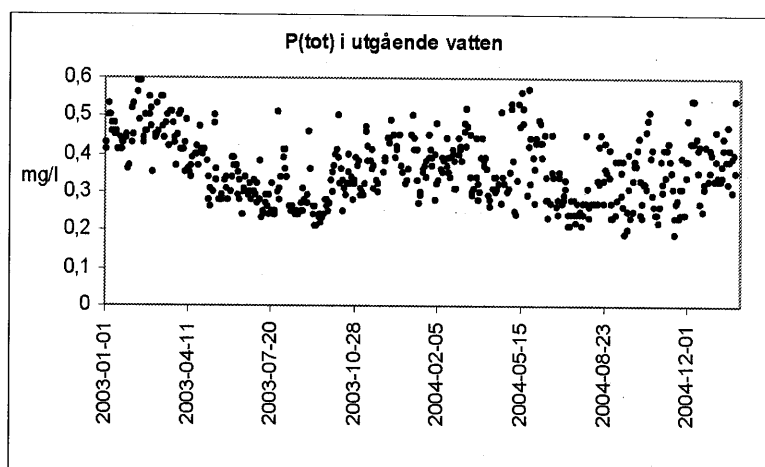


Diagram 1. Totalfosfor i utgående vatten (mg P/l); dygnsmedel

Utsläppen är särskilt höga under perioder med höga inflöden. Vid höga flöden är koncentrationen av P (tot.) i vattnet lägre (se diagram 2) men ändå är reningen under dessa förhållanden sämre (se diagram 3). (Den procentuella reningen har beräknats utifrån skillnaden mellan inkommande och utgående totalfosforhalt.) Anledningen till detta är att verket vid höga inflöden inte har kapacitet att behandla allt vatten och därför tvingas att brädda obehandlat avloppsvatten.

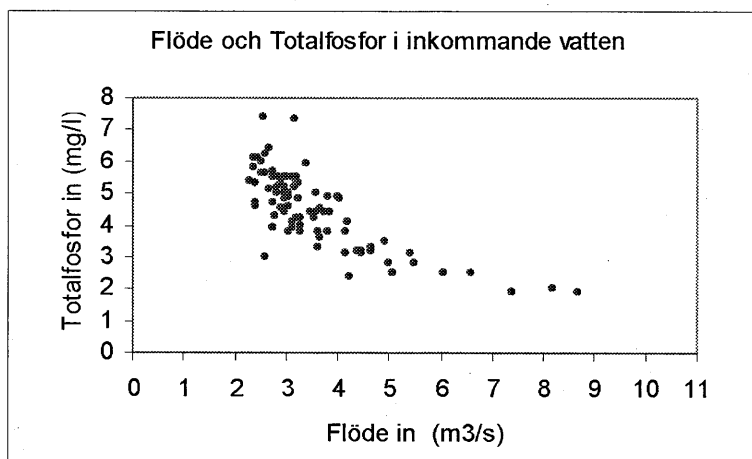


Diagram 2. Totalfosfor i inkommande vatten; veckoprov under tiden 2003-01-01 till 2004-09-20

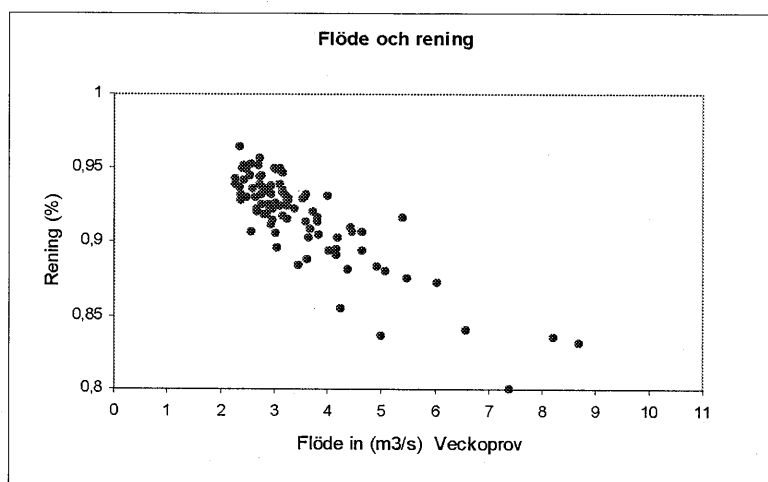


Diagram 3. Rening av P (tot.) i förhållande till inflödet; 2003-01-01 till 2004-09-20

För att klara de nya kraven har Ryaverket beslutat att investera i en anläggning för fosforrening av det bräddade vattnet. Med denna nya anläggning i drift förbättras förutsättningarna betydligt men även fosforreningen i den befintliga anläggningen måste förbättras.

På Ryaverket renas vattnet från fosfor med hjälp av kemisk fällning. Den kemikalie som används är järnsulfat. Doseringen sker idag före försedimenteringen och mängden järn doseras utifrån den utgående fosforhalten. Järndoseringen under 2003 till mitten av 2004 varierade mellan 5-55 g/s, se diagram 4.

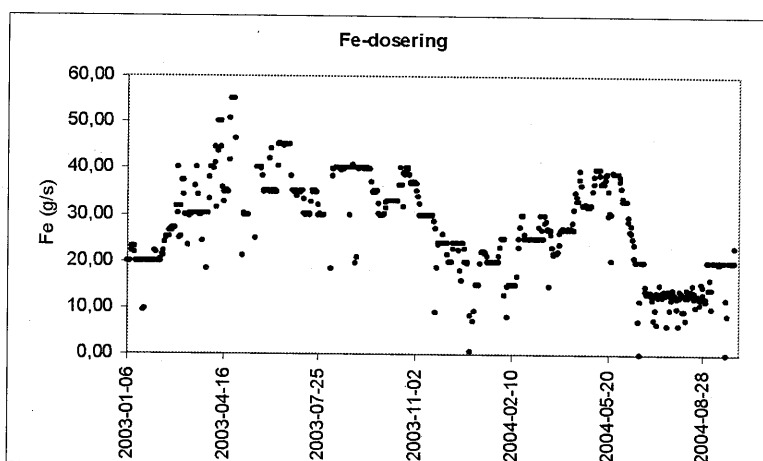


Diagram 4. Dosering av järn (g/s); dygnsmedelvärde under tiden 2003-01-01 till 2004-09-20

En sammanställning av utgående halter av totalfosfor (mg P/l) i förhållande till järndoseringen (g/m^3) under samma period redovisas i diagram 5. Diagrammet visar att sambanden mellan järndoseringen och reningen av fosfor inte är tydliga. Fosforreningen beror alltså inte bara på mängden fällningskemikalier som tillsätts.

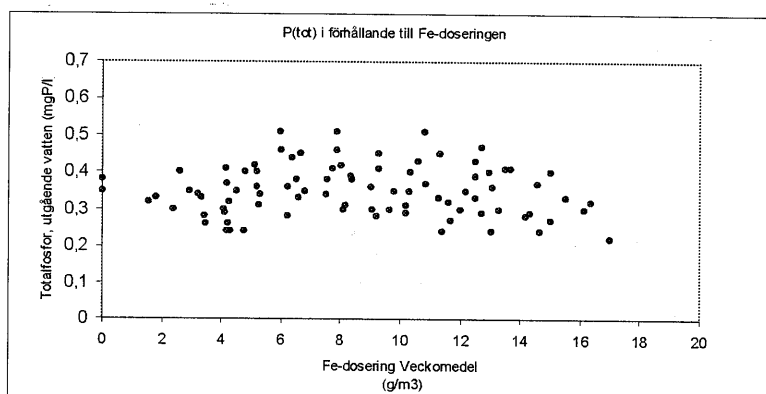


Diagram 5. Förhållandet mellan järndosering och P (tot.)_{ut}; veckomedel under tiden 2003-01-01 till 2004-09-20

Vilka andra parametrar som påverkar fosforeringen är endast till viss del känt. För att Ryaverket skall klara de framtida kraven behöver kunskaperna inom området öka.

1.1 Syfte och Metod

Syftet med detta projekt är studera några av de faktorer som påverkar reningen av fosfor på Ryaverket i Göteborg. Utgångspunkten för projektet är ett tidigare examensarbete, *Phosphorus Removal at The Rya Wastewater Treatment Plant* av Víctor Gíne Sala, som genomfördes vid Institutionen för Vatten Miljö Transport på Chalmers år 2003. I detta projekt utfördes burkförsök i Vattenkemiska laboratoriet på Chalmers för att simulera den kemiska fällningsprocessen på Ryaverket. Försöken planerades utifrån faktorförsöksmetoden. Metoden möjliggör att slutsatser inte bara kan dras om den enskilda parametrarnas påverkan på fosforeringen, utan att även samspel mellan parametrar kan upptäckas.

Samma undersökningsmetod har använts i detta examensarbete. Resultaten från Víctor Gíne Salas studie togs i beaktning då arbetet med den här rapporten inleddes. Målet för rapporten är att

1. Finna ytterligare lämpliga parametrar som kan påverka fosforeringen.
2. Undersöka de nya parametrarna med faktorförsök.

Inverkan av parametrarna bedömdes inte bara utifrån fosfathalten och avskiljningen av SS som i den tidigare studien, utan även halterna av total fosfor, både ofiltrerat och filtrerat, Fe(tot.) och pH förändringar i det behandlade vattnet uppmättes i hopp om att få en bättre förståelse för händelseförloppet kring fosforeringen.

Rapporten inleds med två teorikapitel om förekomsten av fosfor i avloppsvatten (kapitel 2) och en beskrivning av teorin bakom kemisk fosforering (kapitel 3). I kapitel 4 beskrivs den undersökningsmetod som har använts och i kapitel 5, hur laborationerna genomfördes. Det sätt på vilket resultaten från laborationerna analyserades beskrivs i kapitel 6 och därefter sammanställs och diskuteras resultaten i kapitel 7. Till sist presenteras slutsatserna i kapitel 8.

2. Fosfor i avloppsvattnet

I ett obehandlat avloppsvatten kan fosfor förekomma i många olika former. Fosfor finns både löst i vattnet och bundet till kolloider i avloppsvattnet (VA-teknik II). Den totala mängden fosfor i vattnet beräknas enligt ekvation 1 (Henze *et al.* 2002).

$$P_{\text{tot.}} = S_{\text{PO}_4} + S_{\text{p-P}} + S_{\text{org.P}} + X_{\text{org.P}} \quad (1)$$

där	$P_{\text{tot.}}$	total fosfor
	S_{PO_4}	lösta oorganiska ortofosfater
	$S_{\text{p-P}}$	lösta oorganiska polyfosfater
	$S_{\text{org.P}}$	löst organisk fosfor
	$X_{\text{org.P}}$	suspenderad organisk fosfor

I följande kapitel ges en beskrivning av de olika fraktionerna och dess egenskaper.

2.1 Löst fosfor

I avloppsvattnet förekommer fosfor som organiskt bunden fosfor, ortofosfat eller som polyfosfat.

Organiskt bunden fosfor är inte av så stor betydelse i avloppsvatten men kan ibland vara väsentlig i avloppsvatten från industrin. Organiska ämnen är kemiska föreningar som innehåller kol förutom de enkla kolföreningar som ingår i kolsyrasystemet (koldioxid, kolsyra, karbonat samt vätekarbonat) (Henze *et al.* 2002). Organiskt bunden fosfor kommer från fekalier och urin. I vattenlösning hydrolyseras den organiskt bundna fosfor och övergår till ortofosfat (Tchobanoglous *et al.* 1991).

Ortofosfater förekommer i vatten i form av fosforsyra (H_3PO_4), divätefosfat (H_2PO_4^-), vätefosfat (HPO_4^{2-}) och som fosfat (PO_4^{3-}). 50 – 80 procent av totalfosfor i avloppsvattnet utgörs av ortofosfater som härstammar från fekalier och urin. I vilken form ortofosfaterna finns beror på vattnets pH vilket illustreras i diagram 6. I avloppsvatten är pH ofta runt 7 varför de mest framträdande formerna är divätefosfat och vätefosfat (VA-teknik II).

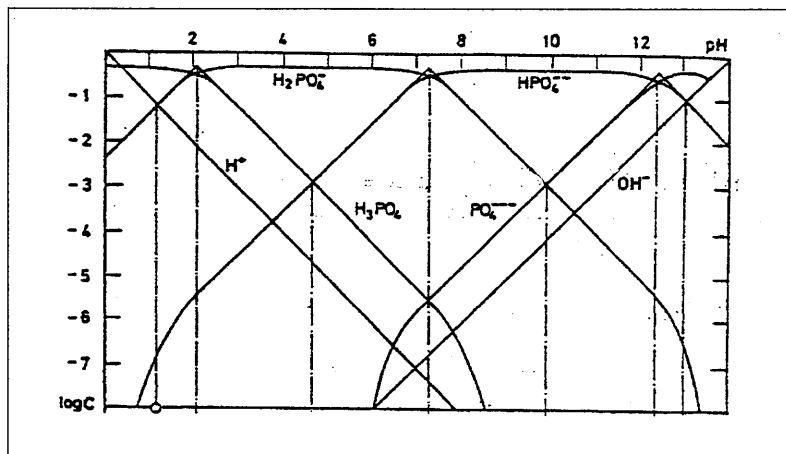


Diagram 6. Diagram som visar i vilka former olika fosfater föreligger som funktion av pH. I diagrammet är den totala koncentrationen av fosfater $5 \cdot 10^{-1}$ mg/l. I kommunalt avloppsvatten är koncentrationen ofta ca $5 \cdot 10^{-4}$ mg/l (VA-teknik II).

Polyfosfater är komplexa molekyler som är uppbyggda av kombinationer av två eller flera fosforatomer, syreatomer och ibland väteatomer. I vattenlösning hydrolyseras polyfosfaterna och övergår till ortofosfater. Denna process är relativt långsam. Polyfosfater kommer främst ifrån tvål och tvättmedel (VA-teknik II).

En idé om fördelning mellan de tre ovan nämnda fraktionerna visas i bild 1. Hur stor del av polyfosfaten och den organiskt bundna fosfor som hydrolyserats till ortofosfat beror bl.a. på transporttiden i ledningsnätet. Med *dissolved* avses den fosfor som är löst, d.v.s. den som passerar genom ett 0.45 µm filter (Henze *et al.* 2002). *Suspended* är de ämnen som är uppslammande, suspenderade, i avloppsvattnet.

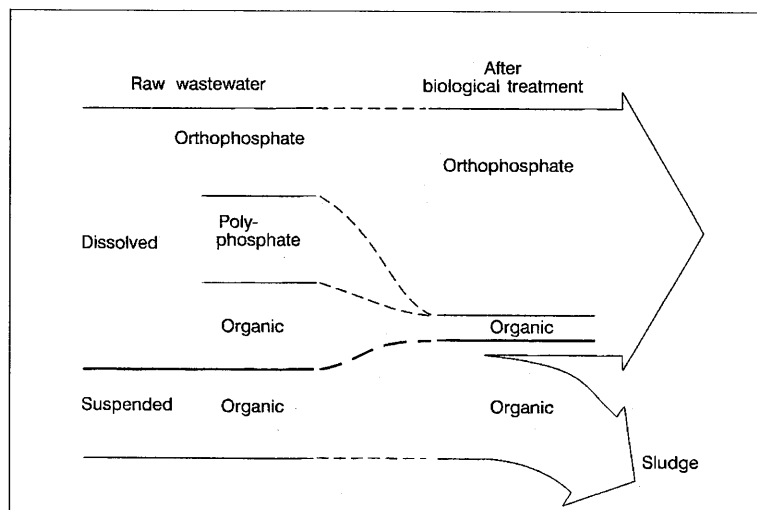


Bild 1. Fraktioner av fosfor i avloppsvatten (Henze *et al.* 2002).

2.2 Kolloider

Med kolloider avses partiklar som är så små att de svävar i den lösning som de befinner sig i. Kolloidernas partikeldiameter, d_p , är i intervallet $10^{-3} \mu\text{m} < d_p < 1 \mu\text{m}$ (Henze *et al* 2002). Kolloider är mycket stabila i vatten och en bra fosforering förutsätter därför att kolloiderna destabiliseras så att även den fosfor som är knuten till kolloiderna kan avskiljas. För att lyckas med detta krävs kunskaper om kolloidernas egenskaper.

Kolloider karakteriseras utifrån vilket förhållande de har till det medel, vatten i detta fall, som omger dem. I det fall kolloiden attraherar det omgivande vattnet kallas kolloiden för hydrofil. Vid repulsion kallas partikeln istället för hydrofob (VA-teknik II). Det händer att vattenmolekyler adsorberas på hydrofoba partiklar men reaktionen mellan vatten och hydrofila partiklar är betydligt vanligare. De hydrofoba kolloiderna består ofta av större partiklar än de hydrofila (Henze *et al.* 2002). Generellt är de organiska kolloiderna hydrofila och de oorganiska hydrofoba.

Anledningen till att de organiska kolloiderna är hydrofila är att de på sin yta har vattenabsorberande föreningar som binder vatten till sig, se bild 2. Bindningarna eller absorptionen av vatten sker via vätebindningar och partiklarna får ett "skal" av vatten kring sig. Detta skal benämns som bundet vatten och följer med partikeln då denna rör sig. En hydrofob partikel omges inte av ett liknande skal (Henze *et al.* 2002).

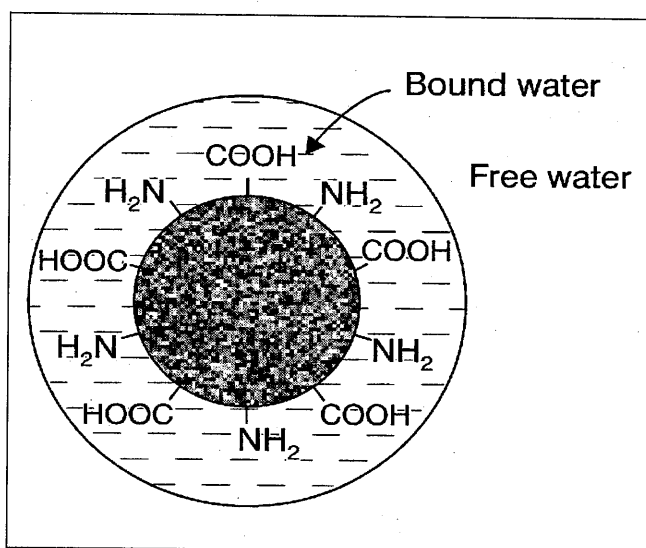


Bild 2. Schematisk presentation av en kolloid hydrofil protein partikel omringad av bundet vatten (Henze *et al.* 2002).

Majoriteten av kolloiderna i avloppsvattnet är negativt laddade. Partikelns laddning kallas för den primära laddningen. Eftersom det på partiklarnas yta finns utåtriktade bindningskrafter kommer ytan att dra till sig atomer eller molekyler av motsatt laddning. Hur de hydrofila kolloiderna agerar har redovisats ovan. De hydrofoba tenderar att adsorbera joner från vattenfasen.

Vid adsorption på ytan bildas ett s.k. elektriskt dubbellager kring partikeln. Lagret av motjoner närmast partikeln kallas utgör det "fixerade" lagret, se bild 3. Något som är utmärkande för små partiklar som kolloider är att den specifika ytan är oerhört stor. Detta innebär att den partikelns yta är stor i förhållande till den volym den upptar. Då partikelns yta är stor får de molekyler och joner som adsorberas på ytan stor betydelse för partikelns egenskaper (vanLoon *et al.* 2000).

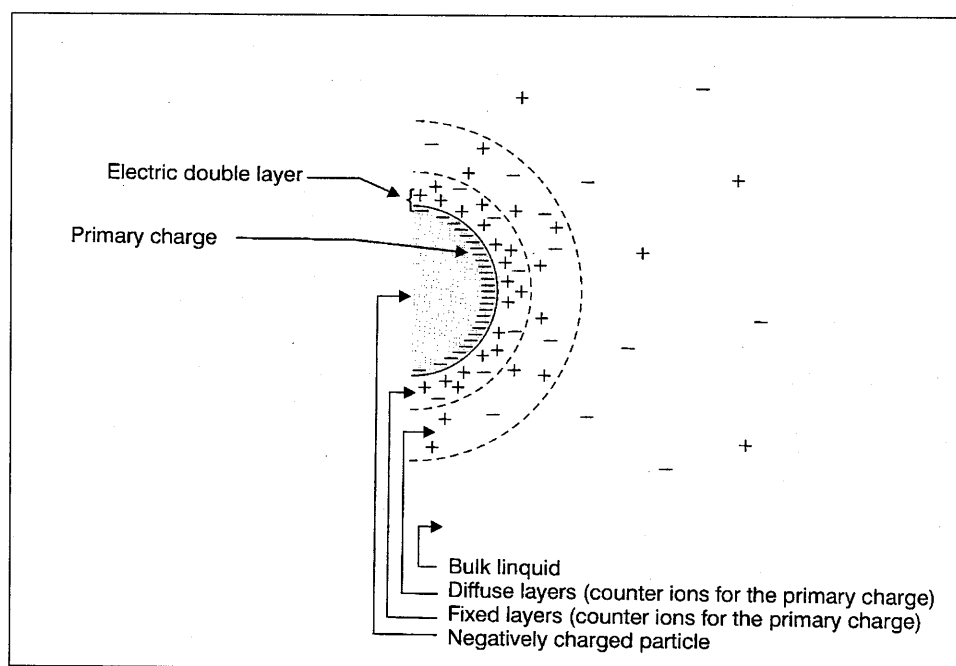


Bild 3. Schematisk presentation av det elektriska dubbellagret kring en kolloid partikel med en negativ ytladdning (Henze *et al.* 2002).

Utanför lagret avtar koncentrationen av motjonerna gradvis tills förhållandena motsvarar koncentrationen i den omgivande vätskan. Gradienten medför att jonerna nära partikeln kommer att sträva efter att diffundera ut i lösningen där koncentrationen är lägre. Dessa två motverkande fenomen resulterar i att ett s.k. diffust skal av joner med varierande laddning bildas utanför det elektriska dubbellagret (Henze *et al.* 2002).

Dubbellagret kring kolloiden producerar repellerande krafter gentemot andra kolloider om dessa har samma laddning. Då avståndet minskar ökar det repellerande krafterna. Det finns även attraktiva krafter, van der Waalska krafter, som verkar mellan kolloiderna. Storleken på krafterna beror på partikelns densitet samt på de atomer som bygger upp partikeln. Attraktionen minskar med ökat avstånd mellan partiklarna.

Skillnaden mellan de repellerande och de attraherande krafterna, den s.k. nettoenergin, utgör en energibarriär som måste övervinnas för att partiklarna skall slås samman. Storleken beror på partiklarnas laddning och på lösningens jonstyrka. Kolloidala system med stor energibarriär är stabila. Balansen mellan de två krafterna illustreras i bild 4.

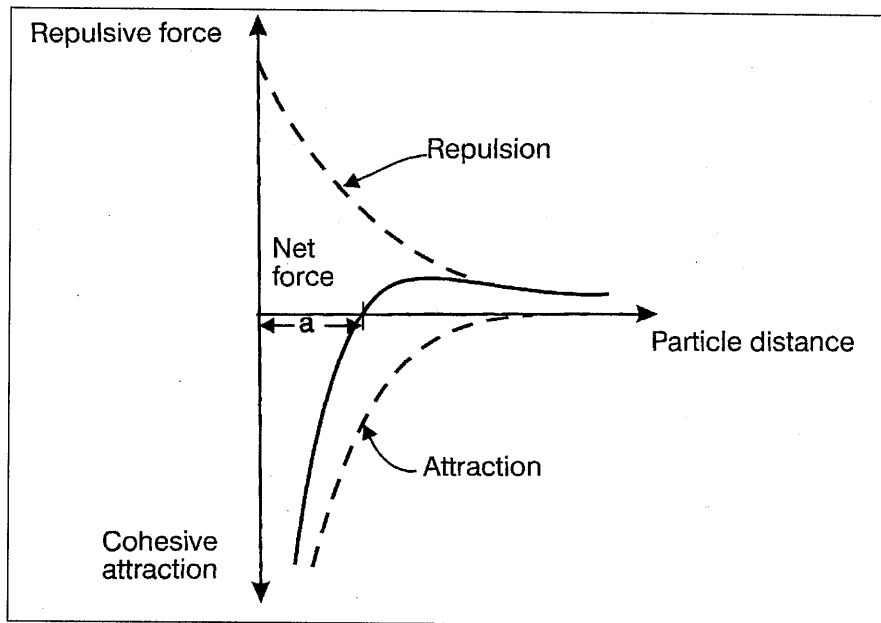


Bild 4. Krafter mellan partiklar som en funktion av avståndet mellan dem. På ett avstånd mindre än a sker attraktion mellan partiklarna och primära partiklar kan bildas (Henze *et al.* 2002).

Ett sätt att mäta storleken på de repellerande krafterna mellan kolloider och därmed få ett mått på kolloidernas stabilitet, är att bestämma Z-potentialen. Den elektriska potentialen varierar med avståndet från partikelns yta. Då kolloiden rör sig i ett elektriskt fält följer ett moln av joner med denna. Potentialen i snittet mellan partikeln och den omgivande vätskan kallas för Z-potentialen. Hos hydrofoba kolloider befinner sig snittet nära gränsen mellan det fixerade och det diffusa skalet. För hydrofila kolloider sammanfaller snittet med gränsen mellan det bundna och det fria vattnet, se bild 5 (Henze *et al.* 2002). I ett råvatten är Z-potentialen runt -20 mV och för att kolloider skall koagulera krävs värden kring ± 5 mV (VA-teknik II).

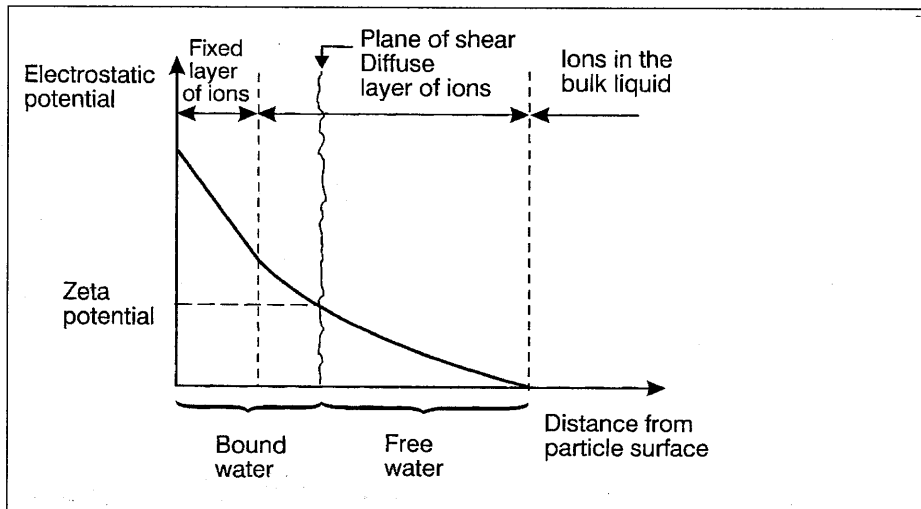


Bild 5. Fördelningen av elektrisk potential kring en laddad hydrofil kolloidal partikel (Henze *et al.* 2002).

Ytladdningen hos organiska och oorganiska partiklar påverkas även av närvaron av syror och baser i vattnet. Hur partikeln påverkas beror på egenskaperna hos de föreningar som är bundna till partikelns yta, se bild 6. pH vid vilket nettoladdningen är noll kallas för den isoelektriska punkten. Vid vilket pH denna punkt inträffar beror på hur stark syra respektive bas föreningarna på ytan är. För organiska partiklar i avloppsvatten ligger pH för denna punkt kring 3-5. Då pH i avloppsvattnet ofta ligger runt 7 är de organiska partiklarna således negativt laddade (Henze *et al.* 2002).

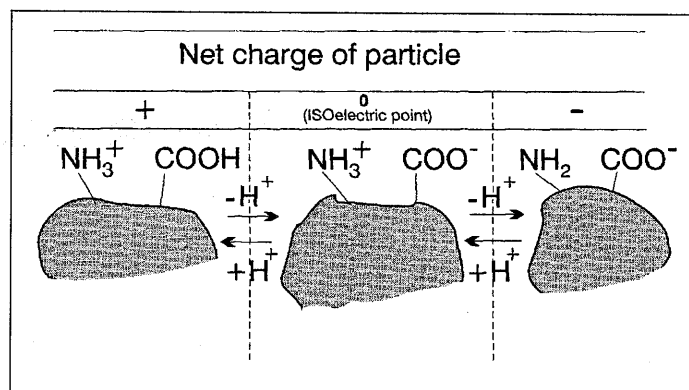


Bild 6. Förändring av ytladdning hos en organisk partikel genom utbyte av vätejoner (Henze *et al.* 2002).

3. Kemisk fosforrening

Fosfor kan avskiljas från avloppsvattnet med hjälp av mekaniska, biologiska och kemiska metoder. Ofta sker reningen genom att dessa metoder kombineras. Syftet med alla reningsprocesser är att få löst fosfor att övergå till suspenderad form som sedan kan avskiljas från vattnet (Henze *et al.* 2002).

För att uppnå en effektiv fosforrening har det visat sig att fysiska metoder är oerhört kostsamma vilket exempelvis är fallet med omvänd osmos och elektrodialys. Den biologiska reningen kan vara väldigt effektiv med en rening uppåt 97 %. Nackdelen med de biologiska metoderna är däremot att de ofta kantas av driftsvårigheter (Clark *et al.* 1997).

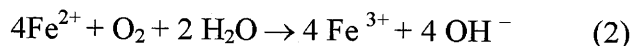
Kemisk rening är den vanligaste metoden och också den som används på Ryaverket. Reningen sker i fyra steg genom fällning, koagulering, flockning och separering. Nedan följer en beskrivning av de olika momenten.

3.1 Fällning

Vid fällning bildar den lösta fosfor, främst ortofosfater, svårslösliga föreningar med metallsalter. Den lösta fosfor med en partikeldiameter, $d_p < 10^{-3} \mu\text{m}$ bildar större partiklar, kolloider, vars partikeldiameter ligger i intervallet $10^{-3} \mu\text{m} < d_p < 1 \mu\text{m}$ (Henze *et al.* 2002).

Lämpliga fällningskemikalier är metallsalter av järn, aluminium och kalcium. Användningen av kalcium är ovanlig dels för att kalken är svårhanterlig och dels för att produktionen av slam är väldigt hög. Aluminium är en väldigt effektiv fällningskemikalie men undviks ofta pga. de hälsorisker som är förknippade med den. Järnsalter har visat sig vara mycket effektiva (VA-teknik II).

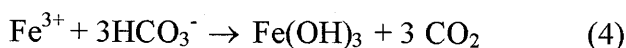
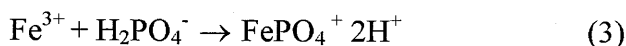
På Ryaverket används järnsulfat, ($\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$), som fällningskemikalie. Järnsulfaten innehåller tvåvärt järn men det är det trevärda järnet som reagerar med fosfat. Efter tillsats oxideras det tvåvärda järnet snabbt till trevärt, se reaktion 2 (VA-teknik II).



För att oxidera Fe (II) till Fe (III) behövs relativt lite syre i vattnet. Uppskattningsvis behövs det 0.14 g $\text{O}_2/\text{g Fe}^{2+}$ som tillsätts (Henze *et al.* 2002). Hastigheten för oxidationen är beroende av många faktorer så som koncentrationen av Fe (II) joner, koncentrationen

av syre och koncentrationen av hydroxidjoner. Hastigheten är även starkt beroende av pH och när pH är $> 7,5$ är den tillräckligt hög (Thistleton *et al.* 2001).

De trevärdade järnjonerna reagerar sedan mycket förenklat enligt reaktion 3 och 4 (Henze *et al.* 2002).



Vid båda reaktionerna reduceras pH och alkaliniteten. Målsättningen är att så mycket av metallerna som möjligt reagerar enligt (3) men reaktionen (4) bidrar även indirekt till fosforreningen vilket förklaras i kapitel 3.2.

Fällningen kan klassificeras utifrån var i reningsprocessen kemikalierna tillsätts och kan ske som förfällning, simultanfällning eller efterfällning. Nedan presenteras de olika alternativen (Henze *et al.* 2002), se även bild 7.

Direktfällning: Används i de fall vattnet inte behöver renas från organiskt material. Här används ofta Fe^{2+} i kombination med $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Förfällning: Kemikalierna tillsätts till det råa avloppsvattnet innan försedimenteringen. Fälld fosfor lämnar reningen i primärslammet. En fördel med denna metod är att den även sänker halten av organiskt material i vattnet så att det biologiska reningssteget avlastas. Här används järn eller aluminium eller en kombination av Fe^{2+} och $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Simultanfällning: Kemikalien tillsätts så att den utfällda fosfor lämnar verket tillsammans med det biologiska slammet. Tillsättningen kan ske efter försedimenteringen, i luftningstanken eller innan eftersedimenteringen. Här används oftast järnsulfat som fällningskemikalie.

Efterfällning: Kemikalien tillsätts efter sedimenteringen av det biologiska slammet. Fällningen kan ske utan närvaro av stora mängder partiklar och organiskt material. Fälld fosfor avskiljs i en separat sedimenteringsanläggning eller med hjälp av filter. Här används ofta aluminium. Nackdelen med denna typ av fällning är att väldigt mycket slam bildas samt att slammet är svårt att avvattna.

På Ryaverket ändras doseringspunkten då och då och fällningen sker antingen som förfällning eller simultanfällning beroende på doseringspunkten.

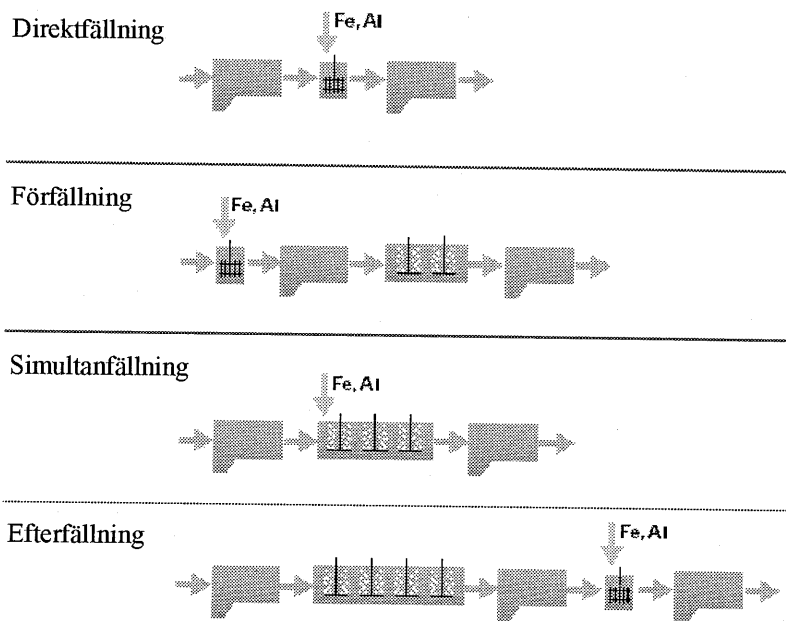


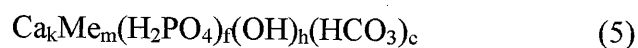
Bild 7. Exempel på utformning av reningsverk för fällning av fosfor. (<http://www.kemwater.se> 050218).

3.2 Koagulering

Vid koagulering bildar de kolloider som bildats vid fällningen och de kolloider som redan innan fanns i vattnet större s.k. primära partiklar (d_p är 10-50 μm). Som tidigare nämnts är en stor del av fosfor i råvattnet inbunden i kolloider och destabiliseringen av dessa är av stor betydelse för fosforeringen. Med hjälp av koagulanter kan kolloidernas motstånd till sammanslagning övervinnas. Processerna kring koaguleringen är komplexa och kunskapen om processerna är begränsade.

I kapitel 2.2 beskrevs hur det elektriska dubbellagret kring kolloiderna medför att dessa repellerar varandra. Vid tillsats av positiva joner som exempelvis Ca^{2+} , Fe^{3+} eller Al^{3+} ackumuleras dessa nära den negativt laddade kolloidens yta. Kolloidens laddning reduceras och tjockleken på det elektriska dubbellagret och Z-potentialen minskar. Kolloiderna kan komma närmare varandra och kommer de tillräckligt nära varandra blir van der Waals krafterna så starka att primära partiklar bildas (Henze *et al.* 2002).

Kolloiderna kan "fångas in" av större flockar i vattnet. Kolloidpartiklarna kan t.ex. absorberas av metallhydroxiderna. Kolloiderna kan också fungera som kärnor för bildandet av fällningen. Sammansättningen på fällningarna är komplex, ett exempel ges i formel 5.



Ett annat sätt att destabilisera kolloider är att tillsätta oorganiska eller organiska polymerer. Polymeren är uppbyggda av kemiska grupper som reagera med kolloidens yta och polymeren adsorberas till partikeln. Då flera kolloider kan bindas till samma polymer bildas "bryggor" mellan dessa, se bild 8. Negativt laddade polymerer fungerar bra trots att kolloiderna själva ofta är negativt laddade. Detta kan förklaras av att positiva joner, som t.ex. Ca^{3+} står som en länk mellan polymeren och kolloiden.

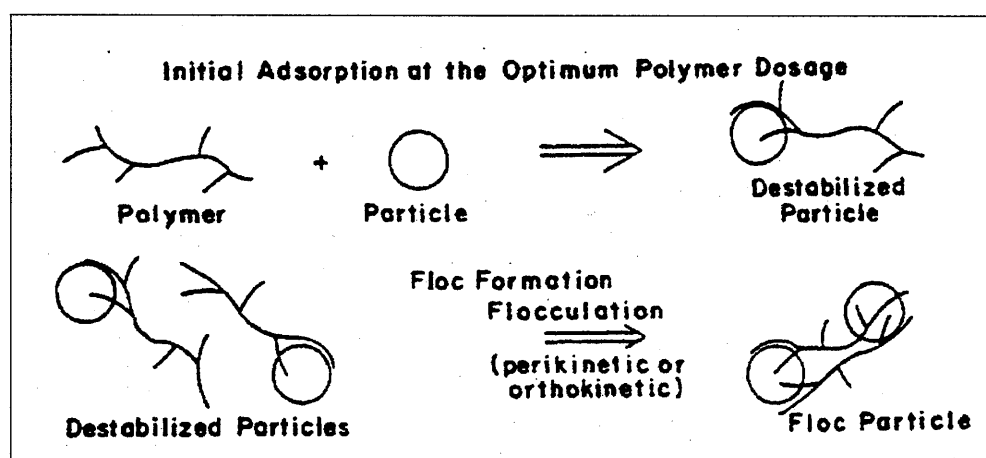


Bild 8. Flockning med hjälp av polymer (VA-teknik II).

3.3 Flockning och separering

Målsättningen med flockningen är att de primära partiklarna som bildats under koaguleringen skall gå samman till större partiklar, s.k. flockar. Genom omrörning i bassängerna kolliderar partiklarna med varandra och flockar bildas (Henze *et al.* 2002). Omrörningen sker med hjälp av paddlar eller så fungerar luftningen i aktivslambassängerna som omrörare. Det är en fördel att dela in flockningsbassängen i flera olika kammare eftersom det då blir enklare att få en bra omrörning. Det är viktigt att omrörningen inte blir för häftig då detta kan leda till att flockarna slås sönder. För att förbättra flockningen tillsätts ibland polymerer.

Efter flockningen skall flockarna separeras. Separering av flockarna sker oftast genom sedimentering. Vid sedimenteringen avskiljs partiklarna genom att de sjunker till botten. Partiklarnas diameter bör vara större än $100\ \mu\text{m}$ för att vara sedimenterbara (Henze *et al.* 2002). Med vilken hastighet flockarna sedimenterar påverkas bl.a. av skillnaden i densitet mellan partikeln och det omgivande vattnet samt av vattnets viskositet. Under sedimenteringen kommer partiklarna att flockas ytterligare. Djupare ner i sedimenteringsbassängen blir koncentrationen av partiklar allt högre och möjligheten till sammanslagning ökar. Större flockar bildas och sjunkhastigheten ökar (VA-teknik II).

4. Undersökningsmetod

Målsättningen med denna rapport är undersöka några av de faktorer som påverkar den kemiska fosforfällningen på Ryaverket. I detta kapitel beskrivs den försöksmetod som använts i denna studie och därefter presenteras de parametrar som har studerats närmare.

4.1 Faktorförsök

För att undersöka den kemiska fosforfällningen har i denna studie faktorförsök använts. Fördelen med denna metod är att den kräver få försök per variabel som skall testas. Vid ett slutfört försök kan slutsatser dras inte bara om den enskilda parameterns påverkan utan även om hur kombinationer av parametrar kan påverka den process som undersöks (Box *et al.* 1978).

Ett faktorförsök definieras av hur många parametrar som studeras och av på hur många olika "nivåer" som dessa testas. I denna studie har ett 2^4 försök valts vilket innebär att fyra parametrar studeras och att varje parameter testas på två olika nivåer. De två nivåerna benämns med – och +. En – nivå kan exempelvis innebära en låg koncentration av ett ämne och en + nivå en hög koncentration.

Vid försöket testas alla möjliga kombinationer av de fyra variablerna. Om den första variabeln har l_1 antal nivåer och den andra l_2, \dots , och den n: te variabeln l_k nivåer krävs att $l_1 \times l_2 \times \dots \times l_k$ försök genomförs för att samtliga variabler skal kombineras. För ett 2^4 försök krävs således 16 försök. Det hade naturligtvis varit önskvärt att testa fler parametrar men ett ökat antal försök hade inneburit en orimlig arbetsbörda. Den försöksmatris som använts redovisas i tabell 1.

Tabell 1. Försöksmatris vid ett 2^4 försök.

Försök	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

4.2 Tidigare undersökning

Utgångspunkten för undersökningen är ett tidigare examensarbete, *Phosphorus Removal at The Rya Wastewater Treatment Plant* av Víctor Gíne Sala, som genomfördes vid Institutionen för Vatten Miljö Transport på Chalmers år 2003. I detta projekt utfördes burkförsök i Vattenkemiska laboratoriet på Chalmers för att simulera den kemiska fällningsprocessen på Ryaverket. Försöken planerades utifrån faktorförsöksmetoden. I Víctor Gíne Salas studier testades fyra parametrar på två olika nivåer, se tabell 2.

Tabell 2. Parametrar och nivåer vid faktorförsök i tidigare examensarbete (Sala, 2003).

Parameter	Nivåer
Järndosering. P:Fe	1:1,5 och 1:4
pH	6,5 och 8
Omrörningshastighet vid järntillsats	200 och 400 varv/minut
Vattnets ursprung	Före eller efter försedimenteringen

Vid försöken gjordes mätningar för att se hur parametrarna påverkade reningen av fosfat samt avskiljningen av SS (Suspended Solids). Följande samband kring reningen av fosfat i filtrerat vatten konstaterades:

- ✓ Ett högt pH förbättrar reningen. Försök med pH i intervallet 6,5-8,8 visade att reningen förbättras då pH höjs men att förbättringen stagnerar vid pH värden kring 8.
- ✓ Ett försedimenterat vatten ger en bättre rening men kräver en högre dos av järn än ett vatten som inte försedimenterats. Försök med järndosering i intervallet P:Fe på 1:0,5 – 1:4 i icke-försedimenterat vatten visade att den optimala doseringen låg på 1:2 – 1:2,5.

Följande samband kring avskiljningen av SS konstaterades:

- ✓ Ett lågt pH ger bättre avskiljning.
- ✓ Försedimenterat vatten ger en bättre avskiljning.
- ✓ Ett försedimenterat vatten ger bättre avskiljning om järndoseringen är hög. Ett icke-försedimenterat vatten ger bättre avskiljning vid en låg järndosering.
- ✓ En hög omrörningshastighet förbättrar avskiljningen av SS i ett försedimenterat vatten.

4.3 Framtagning av parametrar

Avloppsvattnets sammansättning är oerhört komplex och variationerna i det inkommande vattnet stora. Det finns därför en rad olika egenskaper hos avloppsvattnet som skulle kunna påverka fosforeringen. Även det sätt på vilket fällningen sker har effekt på reningen. Nedan redovisas några av de parametrar som skulle kunna vara aktuella

- ✓ pH
- ✓ Koncentrationen av löst syre
- ✓ Humussyror
- ✓ Sulfider
- ✓ Alkalinitet
- ✓ Hårdhet
- ✓ Kalcium
- ✓ SS-halt
- ✓ EDTA
- ✓ Temperatur
- ✓ Mängden organiskt kol
- ✓ Redoxpotential
- ✓ Doseringstillfälle
- ✓ Omrörningshastighet

Endast fyra av dessa parametrar kunde inkluderas i faktorförsöket. De fyra parametrarna valdes ut efter att försök gjorts för att se om parametern hade någon effekt på fosforfällningen. Testerna genomfördes i samma burkar och enligt samma program som det som redovisas i kapitel 5. De parametrar som testades enskilt var pH, koncentration av löst syre, EDTA, humussyror, sulfider och kalcium. Här följer en genomgång av de testade parametrarna.

4.3.1 pH

Det är känt att pH i stor grad påverkar fosforfällningen. Eftersom påverkan är så stor var det viktigt att ha pH som en parameter. pH påverkar fällningen på flera sätt. Vid ett högt pH ökar ortofosfatens (H_2PO_4) löslighet och fällningen förbättras. Hastigheten för oxidationen av Fe(II) till Fe(III) är även den pH beroende och reaktionen gynnas av ett högt pH (Thistleton *et al.* 2001) En nackdel med ett högt pH är att Fe(III) binder till hydroxidjonerna istället för fosfaten men som tidigare nämnts kan även dessa föreningar bidra till fosforeringen.

I Víctor Gíne Salas examensarbete sattes (-) nivån till 6,5 och (+)-nivån till 8 vilket det även gjordes i detta examensarbete. Nivåerna verkar rimliga med hänsyn till pH i inkommande och utgående vatten på Ryaverket, se diagram 7.

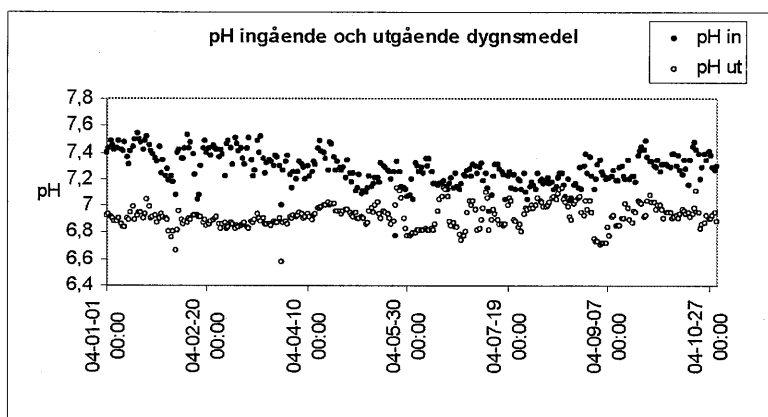


Diagram 7. pH i inkommande och utgående vatten på Ryaverket, dygnsmedelvärden.

Försök för att se huruvida pH påverkade fosforeringen eller ej ansågs inte vara nödvändiga eftersom det redan gjorts (Sala, 2003). För att justera pH i burkarna till den önskade nivån användes 0,4M HCl och 4M NaOH.

Det visade sig under förstudiens gång att det är svårt att säkerställa att de valda förhållandena på pH 6,5 och 8 verkligen råder i burkarna. Anledningen till detta är att tillsatsen av järnsulfat sänker pH kraftigt i burkarna. Järnsulfatlösningen i sig var oerhört sur (0,2) och till det kommer försurande reaktioner under fällningen. Ett försök för att se hur pH förändras gjordes och resultaten redovisas i tabell 3. Mätningen av pH efter skedde efter det att järnsulfat hade doserats och blandats in i vattnet under en minut.

Tabell 3. pH vid fällning

Start	Efter
6,48	6,30
7,92	7,16

pH sjunker främst i de fall det initiala pH-värdet är högt. För att nå de önskade nivåerna behöver pH justeras efter järntillsatsen. Att justera pH tar relativt lång tid och med den mätmetod som användes krävdes kontinuerlig omrörning. En sådan justering skulle störa försöket avsevärt. Många försök och beräkningar ledde fram till slutsatsen att en dosering av x ml järnsulfat skulle följas av $0,26 \cdot x$ ml 4M NaOH för att kompensera för pH sänkningen, se Appendix 1. Ett försök med NaOH enligt det nya "receptet" utfördes; resultaten redovisas i tabell 4.

Tabell 4. pH vid justering

pH före	pH efter
8,02	7,42
6,47	6,47

Justeringen lyckades väl i burken med lågt pH men sämre i den med högt. På Ryaverket är ett pH på 7,5 högt, därför bestämdes att den höjning som blev resultatet av justeringen var tillräcklig.

4.3.2 Löst syre

Det järn som tillsätts avloppsvattnet på Ryaverket är i tvåvärd form. För att detta skall oxideras till trevärt järn krävs syre. En god tillgång på syre förväntas ge mer trevärt järn och följaktligen en bättre fosforrening. De aktuella nivåerna för det här experimentet är att tillsätta syre (+) eller att inte tillsätta syre (-). Under omrörningen sker alltid en viss indrivning av syre, framför allt vid den snabba omrörningen vid försökets start, men vid (+)-nivån tillsätts alltså ytterligare syre. Syret sprids genom en glasstav med en genomsläpplig sten i ena änden som bubblar ut syret i botten av burken med hjälp av en akvariepump. Indrivningen av syre sker under en minut under vilken vattnet mäts på syre. Någon statistik över syrehalter i inkommande vattnet till Ryaverket fanns inte tillgänglig.

Försök gjordes för att studera syretillsatsens inverkan. Tabell 5 nedan visar att luftningen förbättrar fosforreningen. Hela försöket finns redovisat i Appendix 2.

Tabell 5. Procentuell rening av fosfat och totalfosfor, filtrerade prover.

	Utan luftning	Med luftning
Fosfat	52	91
Totalfosfor	58	86

Vid tillsats av syre ökade pH kanske främst på grund av att koldioxid drivs ur avloppsvattnet. Försök gjordes för att se hur stor höjningen var och resultatet presenteras i diagram 8. I de slutliga försöken skall syre tillsättas endast under en minut och enligt diagrammet nedan ger detta endast en liten höjning av pH och därför tas det inte hänsyn till den höjningen vid dessa försök

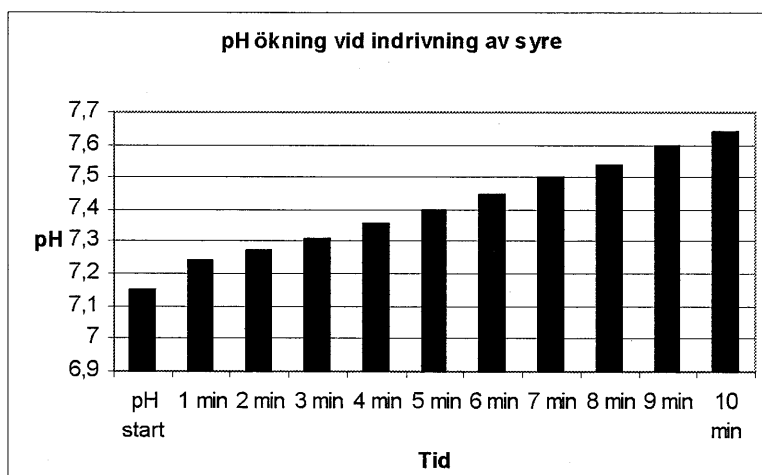


Diagram 8. pH ökning vid syreindrivning.

4.3.3 EDTA

EDTA (Ethylenediamine tetra acetic acid) är liksom fosfat ett komplexbildande ämne som binder joner till sig. Fosfat användes förut flitigt i tvättmedel eftersom det band kalcium- och magnesiumjoner till sig, joner som annars försämrar tvätteffekten. Under 1990-talet minskade fosfatanvändningen kraftigt och ersattes av andra komplexbildare som exempelvis EDTA. Sedan de nya ämnena introducerades har misstankar väckts om att dessa orsakar driftstörningar med bl.a. fällning vid avloppsreningsverk (Komplexbildare 2001).

EDTA binder gärna trevärt järn vilket kan utnyttjas för att avskilja koppar eller zink från avloppsvattnet (Ridge *et al.* 2003). En förekomst av EDTA i avloppsvattnet skulle alltså kunna försämma fosforfällningen eftersom det binder upp järnet.

Att finna lämpliga koncentrationer av EDTA i avloppsvattnet visade sig vara svårt. De nivåer som användes här kommer från en studie genomförd i Schweiz (Kari *et al.* 1995) och en i Sverige (Remberger 2001). I den schweiziska studien redovisas koncentrationer av EDTA i inflödet till tre kommunala reningsverk, se diagram 9. Nivåerna bestämdes slutligen till 20 µg EDTA/l och 150 µg EDTA/l.

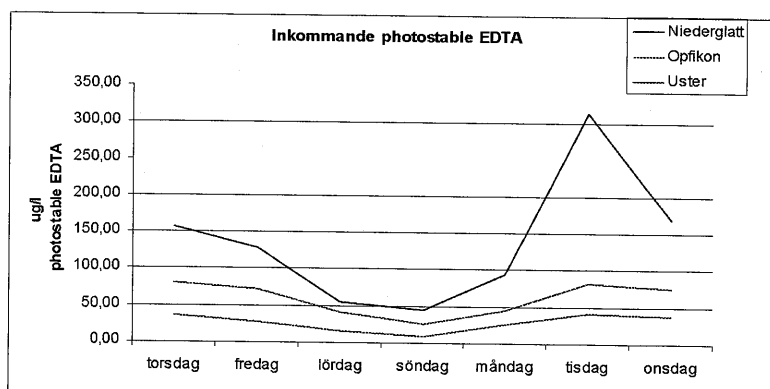


Diagram 9. Inkommande halter av EDTA till tre reningsverk i Schweiz (Kari *et al.* 1995).

Flera försök gjordes med EDTA. Den EDTA lösning som tillsattes blandades till med $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$. Då FeEDTA är ljuskänsligt (Kari *et al.* 1995) var två av burkarna under det första testet täckta. Resultatet av detta försök, se tabell 6, visade att EDTA inte hade någon effekt på fosforeringen.

Tabell 6. Procentuell rening av fosfat, ofiltrerade prover.

Burk nr.	Egenskaper	Rening %
1	Täckt, 150 ug/l	20
2	Täckt, 20 ug/l	21
3	150 ug/l	22
4	20 ug/l	21
5	Blank	20

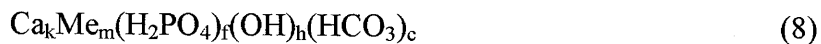
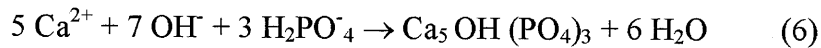
Ytterligare tester gjordes dels med betydligt högre koncentrationer av EDTA och dels med ett lågt pH värdet då detta gynnar bildningen av FeEDTA (Ridge 2003). Försöken visade att EDTA hade en viss effekt på fosforeringen men i dessa fall var koncentrationen så hög att förhållandena inte var representativa för avloppsvatten. EDTA användes därför inte som parameter vid faktorförsöket. En sammanställning av EDTA-försöken redovisas i Appendix 3.

4.3.4 Humus

Humusämnen är organiska ämnen som härstammar från växter eller mikrobiell verksamhet och de består huvudsakligen av kol, syre, väte och kväve. Humus påverkar bl.a. vattnets laddningsbalans, alkalinitet och samverkar med metaller i vattnet (vanLoon *et al.* 2000). En grupp av humusämnen är humussyrorna som kan skapa stabila föreningar med Fe (III) (Tipping *et al.* 2002). Mätningar från Ryaverket gav koncentrationer av humussyror 10-30 mg/l (filtrerat vatten) och 20-50 mg/l (ofiltrerat vatten). Som låg nivå valdes därför 10-20 mg/l och hög 30-40 mg/l. Försök gjordes för att kontrollera humussyrornas inverkan. Vid försöket tillsattes 30 mg humusyra/l. Försöket påvisade ingen skillnad på fosforeringen vid tillsats av humus. Även vid en betydligt högre tillsats av humus skedde ingen förändring varför humus inte kom att användas i faktorförsöken. Försöken redovisas i Appendix 4.

4.3.5 Kalcium

Kalcium kan användas istället för järnsulfat som fällningskemikalie. Beroende på avloppsvattnets egenskaper kan följande föreningar bildas.



Reaktionen 6 gynnas av högt pH och för att goda reningsresultat skall uppnås med endast kalk bör pH vara över 10. På Ryaverket ligger pH runt 7,3 så att fälla fosfor med enbart kalcium är inte aktuellt. Vid lägre pH kommer kalcium även att binda till karbonat, se reaktion 7 (De-Bashan *et al.* 2004). Kalcium kan även bilda stora komplex, formel 8, som kan bidra till fosforeringen.

Vattnet i Göteborg är mjukt och innehåller inte så mycket kalcium. Genom att kalcium tillsätts skulle fosforeringen sannolikt förbättras. Kalciumhalterna i inkommande vatten mäts inte på Ryaverket och därför bestämdes de halter som skulle tillsättas vid försöken utifrån halterna i utflödet från kommunens vattenverk. Från Alelyckan och Lackarebäck var koncentrationerna under 2004 mellan 14 och 25 mg Ca/l (VA-verket Göteborg 2004). Nivåerna valdes till 5 mg Ca/l (-) och 40 mg Ca/l (+) och kalciumlösningen blandades till med CaCl₂. Försök gjordes med dessa nivåer, resultaten redovisas i tabell 7.

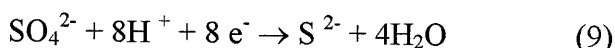
Tabell 7. Procentuell rening av fosfat, ofiltrerade prover

	Blank	5 mg/l	40 mg/l
Rening %	50	50	58

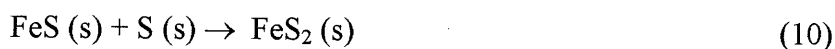
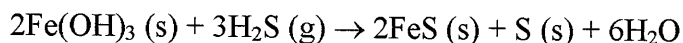
Skillnaderna i reningen var inte så stora men bedömdes ändå som betydelsefulla. Råvattnet på försöksdagen var väldigt utspädd med en fosfathalt på endast 1,15 mg P/l så den förändring som skedde var förhållandevis stor. Försöken redovisas i Appendix 5.

4.3.6 Sulfid

Förekomsten av sulfid i avloppsvattnet är vanligtvis ett resultat av anaerob reduktion av sulfat som utförs av sulfatreducerande bakterier i avloppsledningsnätet. Reduktionen sker enligt (9) och gagnar bl.a. av hög temperatur och hög COD halt (Delgado *et al.* 1998).



Sulfiden kan bilda H_2S som kännetecknas av sin otrevliga lukt, eller H_2SO_4 som är kraftigt korrosivt. Den H_2S som bildas kan reagera med metalljoner och med järnhydroxid så att olösliga sulfider bildas (10) (Williams 2001).



Ryaverket mäter inte kontinuerligt sulfidhalterna men vid anläggningen märks dagar med en hög inkommande halt tydligt på den otrevliga lukten. Några få mätningar fanns tillgängliga, se tabell 8, vilka alla är utförda sommartid då halterna tenderar att vara höga.

Tabell 8. Sulfid i inkommande vatten på Ryaverket.

År	Sulfid (mg/l)
2001	0,03
2002	0,5
2003	3

Utifrån dessa mätningar samt litteraturvärden (Delgado *et al.* 1998; Henze *et al.* 2002) bestämdes de nivåer som skulle testas till 0,5 mg S/l (-) och 2 mg S/l (+). Den sulfidlösning som användes vid försöken framställdes under syrefria förhållanden genom att lösningen bubblades med kvävgas. $\text{Na}_2\text{S}(7-9)\text{H}_2\text{O}$ tillsattes och försök visade att sulfiden hade inverkan på fosforfällningen, se tabell 9. Försöken samt hur sulfidlösningen gjordes redovisas i Appendix 6.

Tabell 9. Procentuell rening av fosfat, ofiltrerade prover.

	2 mg S/l	0,5 mg S/l	Blank
Rening (%)	10	24	28

4.4 Sammanställning av parametrar

Efter undersökningen i kapitel 4.2 fastställdes att följande parametrar och nivåer skulle testas under faktorförsöket, se tabell 10.

Tabell 10. Sammanställning av parametrar och nivåer

Parameter	Nivåer
pH	6,5 och 8
Kalcium	5 mg/l och 40 mg/l
Sulfid	0,5 mg/l och 2 mg/l
Koncentrationen av löst syre	Luftning eller ej

5. Laborationer

I detta kapitel beskrivs de laborationer som utfördes. I avsnitt 5.1 beskrivs hur laborationerna genomfördes och i 5.2 vilka egenskaper som mättes och i vilket skede av laborationen de mättes.

5.1 Genomförande

En försöksomgång omfattas av 16 försök, se tabell 11. För att få ett bra underlag vid den efterföljande analysen av försöken genomfördes varje försöksomgång tre gånger. Försöken utfördes i Vattenkemiska laboratoriet på Chalmers och för att simulera den kemiska fosforfällningen på Ryaverket genomfördes burkförsök. Till varje burk, som rymmer en liter vatten, tillhör ett lock som är försett med en omrörningsanordning, se bild 9. Locket är kopplat till en reglerbox på vilken omrörningshastigheter och respektive omrörningsvaraktighet kan regleras. Det program som användes vid dessa försök är uppbyggt av en minuts snabb omrörning (400 varv/min) efter fällningskemikalien tillsattes, en halvtimmes långsam omrörning (30 varv/min) och avslutningsvis en halvtimmes sedimentering. Hastigheterna och tidsinställningarna är hämtade från det tidigare examensarbetet (Sala, 2003). Enda skillnaden är att den snabba omrörningen har bestämts till 400 varv/min eftersom den gav en bättre rening än 200 varv/min.

Att hinna med en hel försöksomgång under en arbetsdag visade sig inte vara rimligt. En försöksomgång delades därför upp på två arbetsdagar med 8 försök vardera. Sex burkar fanns tillgängliga i laboratoriet varför två av burkarna fick köras två gånger. För att variera ordningen på försöken så att inte försök nummer 1 alltid genomfördes först osv. lottades turordningen.

Varje omgång inleddes med att avloppsvatten hämtades på Ryaverket vid sjutiden på morgonen. Vatten hämtades 24 och 26 januari samt 1 februari år 2005. Vid tiden för experimenten skedde järmdoseringen på Ryaverket före försedimenteringen varför endast rått avloppsvatten har använts för denna studie.

Tabell 11. Teckenmatris för försöken

Försök	pH	syre	kalسيوم	sulfid
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

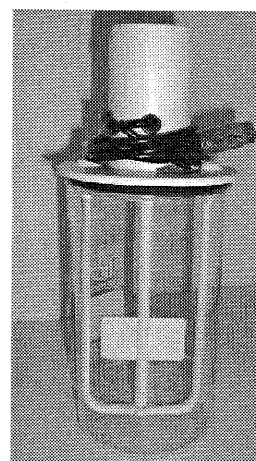


Bild 9. Omrörningsanordning

Vattnet togs i två 20 liters dunkar med ca 15 l i varje och fördes till Chalmers. En av dunkarna förvarades i kylskåp till dagen efter för att minimera förändringarna av vattnets egenskaper. Vattnet i den andra dunken fick sedimentera i 30 min varefter vatten till de 8 burkarna sögs upp med hjälp av en hävert. Efter att burkarna fyllts med vatten påbörjades arbetet med att justera vattnets egenskaper utifrån tabell 11.

Järnsulfatlösning tillsattes enligt ett molförhållande på P:Fe som (1:2). Denna dos bygger på resultat från Víctor Gíne Salas studie som visade att den gav den bästa fosforeringen. Fosfathalten mättes i obehandlat, ofiltrerat vatten. Framställning av järnsulfatlösningen samt hur järndosen beräknas finns i Appendix 7. Justeringen skedde i följande ordning:

1. Justering av pH till 6,5 eller 8.
2. Syretillsats, ingen luftning eller luftning under 1 minut.
3. Järnsulfat och ytterligare pH justering för att kompensera för den pH sänkning som järnsulfaten för med sig.
4. Sulfid 0,5 eller 2 mg/l.
5. Kalcium 5 eller 40 mg/l.

Samtliga justeringar genomfördes i den första burken varpå omrörningen startades, sedan justerades egenskaperna i burk 2 osv. tills omrörningen i samtliga sex burkar hade startats. Tydliga variationer kunde ses efter justeringarna, se bild 10.

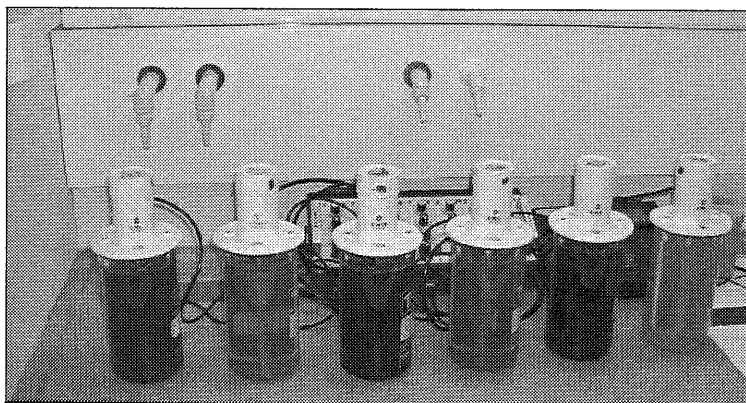


Bild 10. Körning av de sex burkarna. I burk 1, 3 och 5 är sulfidhalten hög vilket förklarar den mörka färgen på vattnet.

När sedimenteringen var klar fördes en pipett försiktigt ner till samma nivå i varje burk för att få jämförbara prover. Proven togs ca 5 cm under vattenytan utan att locket rördes.

5.2 Utförda mätningar

SS (mg/l)

SS mäts för att få en uppfattning av hur mycket partiklar som avskiljs under behandlingen. Först lades filter av typen MGC filter Ø 47 mm Munktell filter eller MGA Ø 55 mm Munktell filter i 105°C varm ugn i en timme. Direkt efter filtren togs ur ugnen vägdes de och sedan filtrerades 50 ml avloppsvatten genom varje filter. Filtrena torkades igen en timme i 105°C och för att sedan vägas en gång till.

SS mättes tre gånger på det obehandlade vattnet och tre gånger på det behandlade vattnet ur respektive burk. Ett medelvärde beräknades utifrån de tre mätningarna.

Fosfat (mg P/l)

Fosfat mättes i filtrerat vatten för att se hur mycket fosfat som fanns löst i vattnet. Det filter som användes var ett membran filter från Schleicher & Schull (0,45 µm Ø 47 mm). Sedan mättes fosfat genom att en PhosVer3 reagenskudde tillsattes till 10 ml vatten i en mätcylinder som sedan skakades i 2 minuter. Mätcylindern placeras i en spektrofotometer (HACH DR 2010) som analyserar provets färg.

Fosfat mättes tre gånger på det obehandlade vattnet och tre gånger på det behandlade vattnet ur respektive burk. Ett medelvärde beräknades utifrån de tre mätningarna.

Totalfosfor (mg P/l)

Totalfosforhalten innefattar inte bara halten av fosfat utan även den fosfor som förekommer i andra former i vattnet. För att mäta totalfosfor så uppsluts provet i en mikrovågsugn, se Appendix 8. När provet svalnat mättes fosforhalten med samma metod som fosfat. Totalfosforhalten bestämdes i ofiltrerat och filtrerat, behandlat och obehandlat vatten.

Fe(II) och Fe(tot.)

Järn mättes med en standardmetod, se Appendix 9. Från början mättes både järn (II) och totaljärn men efter första omgången mättes endast totaljärn. I kontakt med syre minskar koncentrationen av järn (II) och mätningarna var därför svåra att utföra. Alla prover som var behandlade filtrerades (0.45 µm) innan mätning. Målsättningen med mätningen är att se hur mycket av tillsatta järnet som har reagerat. I det obehandlade vattnet mättes järnhalten i både filtrerade och ofiltrerade prover. Det ofiltrerade vattnet uppsluts på samma sätt som vid mätning av totalfosfor. Alla koncentrationer som blev negativa sattes till noll.

pH

pH mättes i burkarna före och efter behandlingen med en Orion pH meter modell 420A. pH mätaren kalibrerades innan mätningarna började varje dag.

Syre

Syre mättes i burkarna före och efter behandlingen med ett portabelt WTW oxi 91 instrument. Instrumentet kalibrerades innan faktorförsöken började. Mätningarna var tidskrävande och krävde en kontinuerlig omrörning och under denna omrörning fanns det risk att ytterligare syre drevs in i vattnet.

Resultaten från de sex laborationerna är sammanställda i Appendix 10.

6. Analys

I detta kapitel förklaras hur mätningarna från laborationerna analyseras och i räkneexemplet analyseras den procentuella reningen av fosfat. I det första avsnittet beskrivs hur en parameters påverkan, den s.k. effekten, på en mätning av fosfatreningen kan beräknas. Vidare redovisas två alternativa metoder, analytisk och grafisk metod, för att bedöma om den uträknade effekten är av betydelse. Slutligen presenteras hur resultaten kan framställas då en kombination av parametrar visar sig ha effekt på reningen.

6.1 Beräkning av effekter

Vid analysen av försöksresultaten utförs beräkningar på en mätserie i taget. De mätserier som analyseras är fosfathalter, totalfosfor filtrerade och ofiltrerade halter, SS, pH samt halter av Fe(tot.). I tabell 12 redovisas fosfatreningen i procent för försök 1-16. För att analysera resultaten beräknas effekterna. Med effekt avses den förändring som sker då man rör sig från minus- till plusnivån hos en variabel. Effekten beräknas som medelvärdet av försöksomgångar med plusnivå minus medelvärdet av alla omgångar med minusnivå, se ekvation 9 (Box *et al.* 1978). I tabell 13 redovisas medelvärdet för den procentuella reningen av fosfat per försök då hänsyn tagits till sulfidnivån.

Tabell 12. Fosfatrening i procent för försök 1-16

Försök	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	Medel	Varians
1	47,0	50,0	90,2	62,4	582,9
2	84,2	97,3	99,1	93,5	66,3
3	83,8	87,8	67,8	79,8	112,9
4	82,1	90,4	94,1	88,9	37,7
5	75,2	72,6	77,2	75,0	5,3
6	94,6	91,0	97,8	94,5	11,7
7	85,3	69,3	93,7	82,8	154,3
8	91,7	99,2	97,5	96,1	15,2
9	27,9	23,3	58,0	36,4	355,5
10	82,6	95,1	95,2	91,0	52,0
11	61,5	78,6	62,2	67,4	93,5
12	89,0	91,8	85,6	88,8	9,5
13	42,9	31,8	31,6	35,4	42,0
14	89,7	90,2	88,1	89,3	1,2
15	38,1	49,4	89,1	58,9	717,6
16	95,3	96,7	97,2	96,4	1,0
Medel	73,2	75,9	82,8	77,3	141,2

Tabell 13. Procentuell fosfatrening. Underlag för effektberäkning för sulfid

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid	Medel (%)	Summa
1	-	-	-	-	62,4	-
2	+	-	-	-	93,5	
3	-	+	-	-	79,8	
4	+	+	-	-	88,9	
5	-	-	+	-	75,0	
6	+	-	+	-	94,5	
7	-	+	+	-	82,8	
8	+	+	+	-	96,1	
9	-	-	-	+	36,4	
10	+	-	-	+	91,0	
11	-	+	-	+	67,4	
12	+	+	-	+	88,8	
13	-	-	+	+	35,4	
14	+	-	+	+	89,3	
15	-	+	+	+	58,9	
16	+	+	+	+	96,4	

Effekten för sulfid beräknas enligt ekvation 9.

$$\begin{aligned} \text{Effekten} &= \frac{1}{8} (\sum \text{plusvärdena} - \sum \text{minusvärdena}) = & (9) \\ & \frac{1}{8} (563,5 - 673) = (70,4) - (84,1) = -13,7 \end{aligned}$$

Den beräknade effekten betyder att om sulfidnivån förändras från den höga nivån till den låga så förbättras fosfatreningen med ca 14 % se även bild 11.

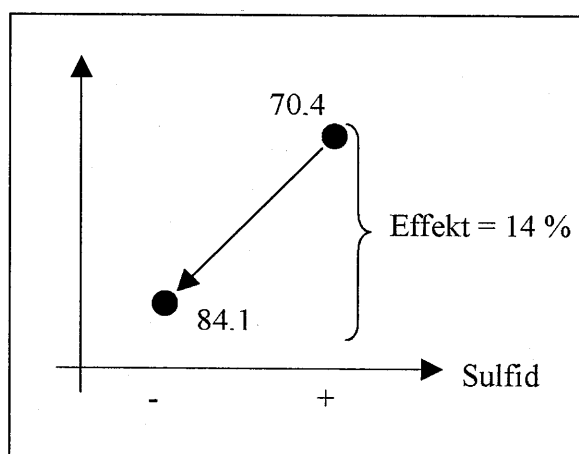


Bild 11. Medelvärden av den procentuella reningen av fosfat vid en hög respektive låg sulfidnivå. Effekten är skillnaden mellan de två nivåerna.

Effekterna kan beräknas inte bara för de fyra parametrarna ovan, utan även för kombinationer av dessa. För att göra detta möjligt måste först teckentabellen ovan kompletteras med kolumner för kombinationer av alla möjliga kombinationer av två, tre och fyra parametrar. Kolumnen för kombinationen av exempelvis pH och syre erhålls genom att tecknen för pH och syre multipliceras på respektive rad. Totalt kan effekten beräknas för 15 olika parametrar/kombinationer av parametrar. Den kompletta tabellen redovisas i Appendix 11.

6.2 Analytisk tolkning av effekter

Då effekterna för de femton kolumnerna beräknas bedöms om den kalkylerade effekten är signifikant. Med en signifikant effekt avses att den avvikelse som observeras beror på att parametrarna har ändrats (Devore *et al.* 1999). För att göra denna bedömning beräknas standardavvikelsen för effekten. Om det finns mer än en mätserie kan avvikelsen beräknas enligt ekvation 11 (Box *et al.* 1978).

$$\sigma_{\text{effekt}} = \sqrt{(4/N) * \sigma_{\text{medel}}^2} \quad (11)$$

där σ_{medel}^2 = medelvärdet av variansen för försök 1-16
 N = antalet försök (16 försök*3 omgångar= 48)

De effekter som betraktas som signifikanta är de, för vilka inget teckenskifte sker mellan effekten $\pm 2 * \sigma_{\text{effekt}}$ (95 % konfidens). Detta illustreras i tabell 14.

Tabell 14. Effekter och signifikans för procentuell rening av fosfat

	pH	syre	pH + syre	kalcium	pH + kalcium	syre + kalcium	pH+syre+kalcium	sulfid	pH + sulfid
Summa +	738,5	659,0	579,4	628,4	622,3	617,5	634,6	563,5	665,4
Summa -	498,1	577,5	657,1	608,2	614,2	619,0	601,9	673,0	571,1
Effekt	30,1	10,2	-9,7	2,5	1,0	-0,2	4,1	-13,7	11,8
Effekt+2effektst.av	36,9	17,1	-2,8	9,4	7,9	6,7	10,9	-6,8	18,7
Effekt-2effektst.av	23,2	3,3	-16,6	-4,3	-5,8	-7,1	-2,8	-20,5	4,9
Signifikans	X	X	X					X	X

	syre + sulfid	pH syre sulfid	kalcium sulfid	pH kalcium sulfid	syre kalcium sulfid	pH syre kalcium sulfid
Summa +	636,84	607,56	604,58	629,67	620,75	618,70
Summa -	599,68	628,96	631,94	606,85	615,78	617,82
Effekt	4,65	-2,68	-3,42	2,85	0,62	0,11
Effekt+2effektst.av	11,51	4,18	3,44	9,71	7,48	6,97
Effekt-2effektst.av	-2,21	-9,54	-10,28	-4,01	-6,24	-6,75
Signifikans						

Beräkningarna visar att pH, syre, pH + syre, sulfid och pH + sulfid har en signifikant effekt på avskiljningen av fosfat. Exempelvis är avskiljningen 30 % bättre vid en hög pH nivå.

Det finns andra sätt med hjälp av vilka en bedömning om en effekts signifikans kan göras. Den metod som presenteras här har fördelen att signifikansen kan bedömas även i de fall mätserien endast har registrerats vid ett tillfälle.

Metoden bygger på antagandet att vissa av de beräknade effekterna inte är signifikanta och utifrån dessa kan en förväntad varians hos de övriga effekterna beräknas. De många faktorförsök som utförts genom åren har visat att effekterna för kombinationer av tre eller flera parametrar väldigt sällan är signifikanta (Devore *et al.* 1999).

Den antagna variansen beräknas genom att först välja ut m stycken effekter E_1, E_2, \dots, E_m som kan antas vara insignifikanta. Variansen beräknas sedan enligt ekvation 12.

$$\text{Variansen} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_i^2 \quad (12)$$

Konfidensintervallet för en effekt kan sedan bestämmas enligt ekvation 13. Antalet frihetsgrader är m och liksom vid i signifikanstesten ovan används 95 % konfidensintervall.

$$\text{Konfidensintervall för effekten } E = E \pm t_{\alpha/2} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_i^2} \quad (13)$$

6.3 Grafisk tolkning av effekter

Ett alternativt sätt att bedöma om en effekt är signifikant är att tolka de beräknade effekterna grafiskt. Detta möjliggörs genom att skapa en normalfördelningsplot (Devore *et al.* 1999). Effekterna arrangeras först i storleksordning, se tabell 15 och plottas sedan med hjälp av MATLAB.

De flesta av de små effekterna tenderar att ligga nära en rak linje. Det är de effekter som faller långt ifrån denna linje som är av betydelse. Det är inte helt självklart att avgöra vilka av de små effekterna som skall avgöra hur linjen skall dras. I denna rapport används "normplot"-funktionen i MATLAB i vilken linjen dras utifrån effektvärdena för den första och den tredje kvartilen. De effekter som utmärker sig är pH, pH+ sulfid, syre, pH + syre och sulfid, se diagram 10. Samma effekter gav signifikans vid beräkningarna. Visar båda tolkningssätten på signifikans kan slutsatsen dras att en effekt verkligen föreligger.

Tabell 15. Effekterna för den procentuella reningen av fosfat.

Parameter	Effekt
sulfid	-13,68
pH + syre	-9,71
kalcium sulfid	-3,42
pH syre sulfid	-2,68
syre + kalcium	-0,19
pH syre kalcium sulfid	0,11
syre kalcium sulfid	0,62
pH + kalcium	1,02
kalcium	2,52
pH kalcium sulfid	2,85
pH+syre+kalcium	4,09
syre + sulfid	4,65
syre	10,19
pH + sulfid	11,80
pH	30,05

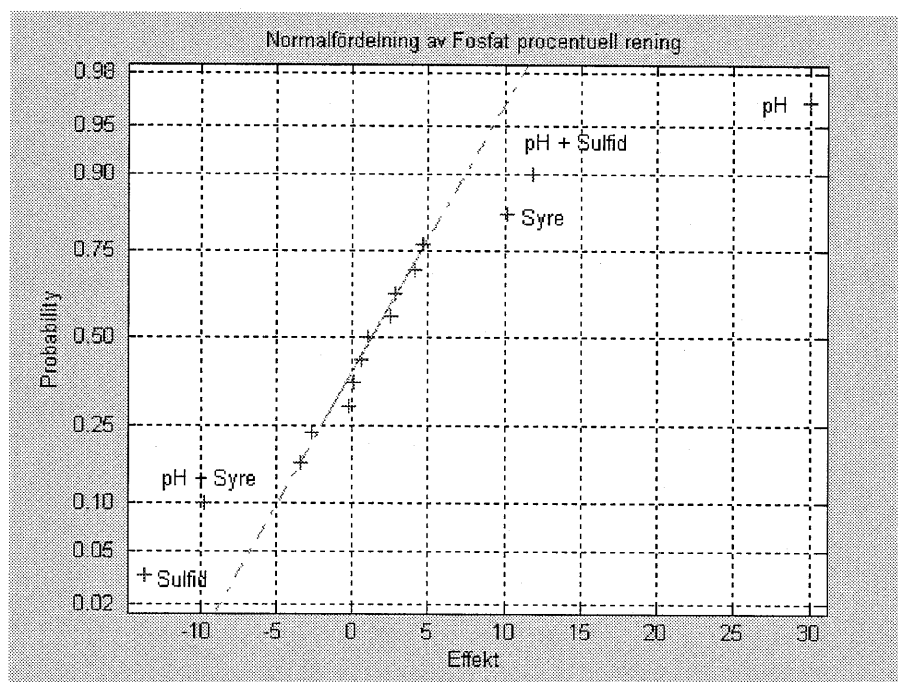


Diagram 10. Normalfördelningsplot av effekterna vid procentuell fosfatrening

6.4 Interaktion mellan parametrar

I exemplet med den procentuella fosforreningen ovan, visar det sig att inte bara enskilda parametrar som sulfid, pH och syre har effekt på reningen utan även kombinationer av parametrar påverkar reningen. I det fallet finns signifikans för kombinationen av pH och sulfid men även för pH och sulfid enskilt. I ett sådant fall får slutsatser endast dras utifrån interaktionen mellan parametrarna eftersom effekten av den enskilda parametern är ett resultat av bådass inverkan. Att tolka interaktionen mellan två parametrar är lite mer komplicerat än tolkningen av en enskild parameters inverkan.

Som illustrerats i bild 11 innebär effekten att

fosfatreningen blir ca 14 % sämre då förhållandena vid försöket ändras från en plusnivå av sulfid till en minusnivå. Skillnaden vid analys av kombinationer av parametrar är innebörden av plus och minusnivåerna. Tecknet för pH+syre beräknas genom att de enskilda tecknen multipliceras med varandra. Plusnivån innebär alltså att tecknet för både pH och syre är likadant, se tabell 16.

För att få en tydligare bild av betydelsen av interaktionen kan denna presenteras som i bild 12. I bilden visas den procentuella reningen av fosfat vid de fyra olika kombinationerna av syre- och pH-nivåerna. Värdet längst upp i vänstra hörnet (72 %) är ett medelvärde av försöken 3, 7, 11 och 15 där syrenivån är hög och pH nivå låg. De övriga medelvärdena är beräknade på liknande sätt. Bilden visar att det mest gynnsamma förhållandet är högt pH i kombination med god tillgång på syre.

Tabell 16. Tecken för pH, syre samt pH+syre.

Försök	pH	syre	pH + syre
1	-	-	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	+
5	-	-	+
6	+	-	-
7	-	+	-
8	+	+	+
9	-	-	+
10	+	-	-
11	-	+	-
12	+	+	+
13	-	-	+
14	+	-	-
15	-	+	-
16	+	+	+

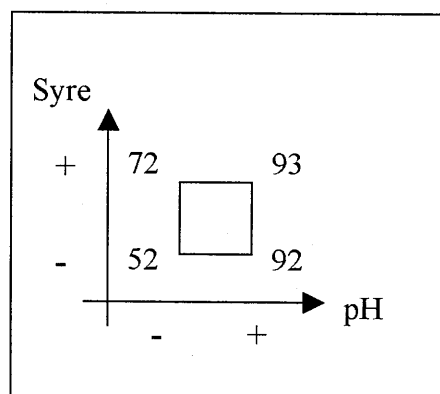


Bild 12. Medelvärden av den procentuella reningen av fosfat vid interaktion mellan pH och syre.

6.5 Analys av pH

För att analysera de pH-förändringar som uppmättes under försökens gång används ett annorlunda upplägg. Detta beror på att variationerna i pH-förändringarna skiljer sig åt beroende på vilken pH-nivå som var aktuell vid försökets start. För att kunna studera skillnaderna delas 2^4 försöket (sexton försök), upp i två stycken 2^3 försök (åtta försök). Vid denna delning lyfts en av parametrarna ut ur försöket, i detta fall pH, och kommer istället för att varieras att hållas konstant.

I det ena 2^3 försöket är pH-nivån 6,5 (de vita fälten i tabell 17) och i det andra försöket är nivån 8 (de grå fälten i tabell 17). Effekterna analyseras på samma sätt som tidigare men endast sju effekter per försök analyseras istället för de femton som undersöks i ett 2^4 försök, se tabell 18.

Tabell 17. Matris för 2^3 försök

pH	Försök	Syre	Kalcium	Sulfid
-	1	-	-	-
+	2	-	-	-
-	3	+	-	-
+	4	+	-	-
-	5	-	+	-
+	6	-	+	-
-	7	+	+	-
+	8	+	+	-
-	9	-	-	+
+	10	-	-	+
-	11	+	-	+
+	12	+	-	+
-	13	-	+	+
+	14	-	+	+
-	15	+	+	+
+	16	+	+	+

Tabell 18. Teckentabell vid beräkning av effekter vid de båda 2^3 försöken

Försök	syre	kalcium	sulfid	syre kalcium	syre sulfid	kalcium sulfid	syre kalcium sulfid
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

7. Resultat och diskussion

I detta kapitel presenteras resultaten av faktorförsöken. Beräkningar har utförts på mätserierna för SS, fosfat filtrerat, totalfosfor filtrerade och ofiltrerade halter, Fe(tot.) och slutligen pH. Mätserierna är tilldelade varsitt avsnitt i detta kapitel. I varje avsnitt redovisas först variationerna mellan de sexton försöken och sedan de effekter som är betydelsefulla. I de fall där parametrar påverkar varandra studeras även interaktionen dem emellan.

Tre försöksomgångar har genomförts för att kunna säkerställa att de variationer som konstaterats inte var tillfälliga. Målsättningen var att de tre försöksomgångarna skulle vara identiska, men eftersom egenskaperna hos det avloppsvatten som hämtats från Ryaverket varierar från dag till dag var det omöjligt att uppfylla detta mål. Några av de variationer som registrerats av Ryaverket under de dagar som vatten hämtades är sammanställda i tabell 19.

Tabell 19. Variationer i det hämtade vattnet.

OMGÅNG		1	2	3
INFLÖDE (m ³ /s)		4,39534	3,477286	3,374562
JÄRN-DOS (g/s)		22,05963	23,30587	29,68137
FÖRSEDIMENTERT VATTEN	COD(tot) (mg/l)	140	190	220
	COD(löst) (mg/l)	50	61	82
	P(tot) (mg/l)	2,3	3,1	3,8
	SS (mg/l)	-	96	112
UTFLÖDE	SS (mg/l)	-	9,2	17,6
	COD(tot) (mg/l)	48	53	-
	P(tot) (mg/l)	0,3	0,4	0,72

Vid försöken märks skillnader mellan de olika försöken 1-16 men även skillnader mellan reningsgraden i omgångarna ett till tre. Reningen av fosfat, totalfosfor filtrerat och ofiltrerat samt SS förbättrades successivt från omgång ett till tre. Särskilt dålig var avskiljningen av SS i omgång ett, då SS-halten efter behandlingen i de flesta fall t.o.m. var högre än i det obehandlade vattnet. Även reningen av totalfosfor, ofiltrerade värden var betydligt sämre i omgång ett.

7.1 SS

SS har analyserats utifrån den procentuella minskningen av SS-halten i det behandlade vattnet i förhållande till SS-halten i det obehandlade enligt ekvation 14.

$$(\text{mg SS/l före} - \text{mg SS/l efter}) / \text{mg SS/l före} \quad (14)$$

Den procentuella skillnaden visade sig vara mycket olika vid de tre försöksomgångarna, se diagram 11. I omgång ett var SS-halten vid ett flertal tillfällen högre efter behandling än före, vilket inte verkar rimligt. Avvikelsen kan kanske bero på att vattnet vid denna omgång var betydligt mer utspädd p.g.a. ett högt inflöde till Ryaverket, se tabell 19. P.g.a. avvikelserna i omgång ett utfördes därför beräkningar av effekter bara utifrån mätningarna i omgång två och tre.

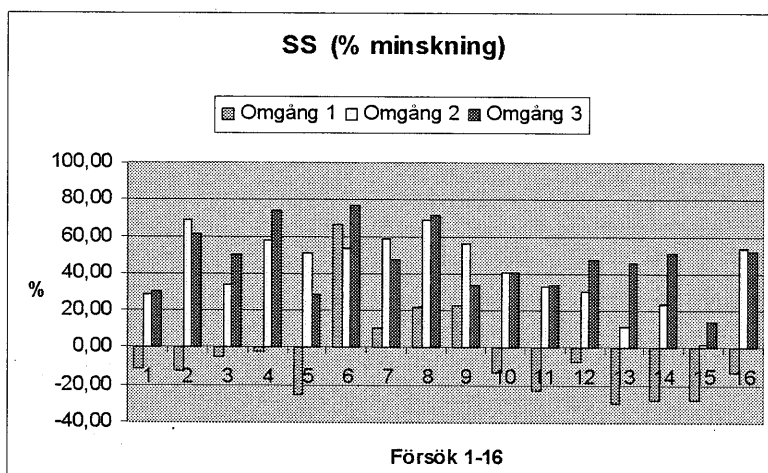


Diagram 11. Procentuell minskning av SS.

I tabell 20 visas de beräknade effekterna och de som gav signifikans var:

- pH: På hög nivå avskiljs 19,7 % mg SS/l mer.
- Sulfid: På låg nivå avskiljs 18,3 % mg SS/l mer
- pH, sulfid och kalcium: På hög nivå avskiljs 8,5 % mg SS/l mer

Normalfördelningsplotten av effekterna i diagram 12 visar att pH och sulfid har signifikans men kombinationen av pH, sulfid och kalcium utmärker sig inte. Sammanfattningsvis kan sägas att bäst avskiljning fås vid ett högt pH och en låg sulfidnivå. I det fall dessa förhållanden kombineras med en hög kalciumnivå tenderar avskiljningen att bli något bättre.

Tabell 20. Effekter och signifikans vid procentuell minskning av SS

	pH	syre	pH + syre	kalcium	pH + kalcium	syre + kalcium	pH+syre+kalcium	sulfid	pH + sulfid
Summa +	436,4	364,9	371,1	354,6	375,4	365,1	372,6	284,3	333,5
Summa -	279,0	350,5	344,3	360,8	339,9	350,3	342,8	431,1	381,9
Effekt	19,7	1,8	3,3	-0,8	4,4	1,8	3,7	-18,3	-6,0
Effekt+2effektst.av	28,2	10,3	11,9	7,8	13,0	10,4	12,3	-9,8	2,5
Effekt-2effektst.av	11,1	-6,7	-5,2	-9,3	-4,1	-6,7	-4,8	-26,9	-14,6
Signifikans	X							X	

	syre + sulfid	pH syre sulfid	kalcium sulfid	pH kalcium sulfid	syre kalcium sulfid	pH syre kalcium sulfid
Summa +	332,46	390,13	329,11	391,89	359,20	368,76
Summa -	382,92	325,25	386,27	323,50	356,18	346,63
Effekt	-6,31	8,11	-7,15	8,55	0,38	2,77
Effekt+2effektst.av	2,23	16,65	1,39	17,09	8,92	11,31
Effekt-2effektst.av	-14,85	-0,43	-15,69	0,01	-8,16	-5,77
Signifikans				X		

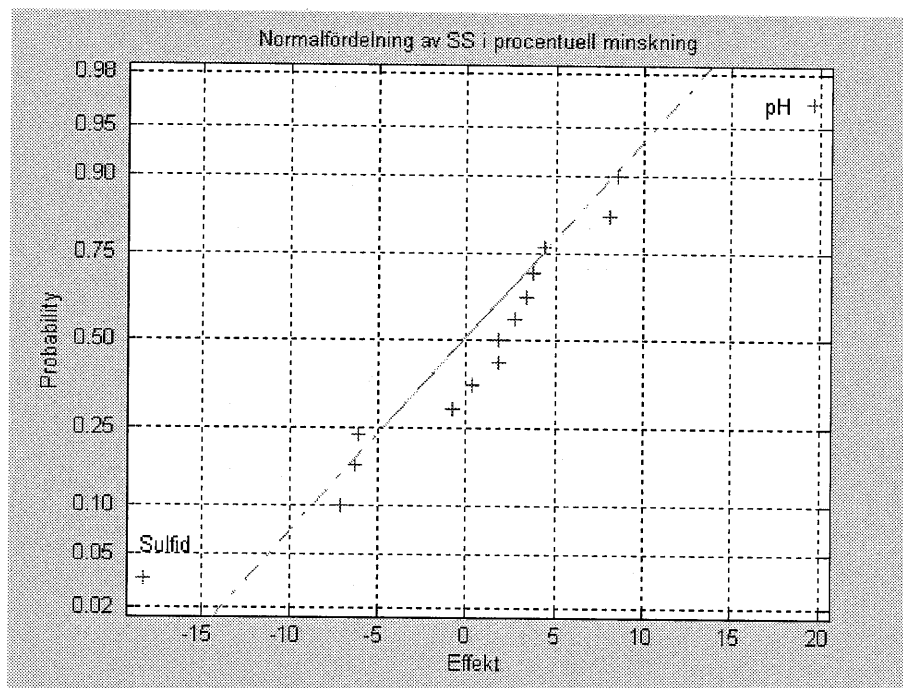


Diagram 12. Normalfördelningsplot av effekterna vid den procentuella minskningen av SS.

7.2 Fosfat

Fosfat har analyserats utifrån den procentuella minskningen av fosfathalten i det filtrerade behandlade vattnet i förhållande till halten i det obehandlade enligt ekvation 15.

$$(\text{mg P/l före} - \text{mg P/l efter})/\text{mg P/l före} \quad (15)$$

Den procentuella skillnaden visade sig vara likartad vid de tre försöksomgångarna, se diagram 13.

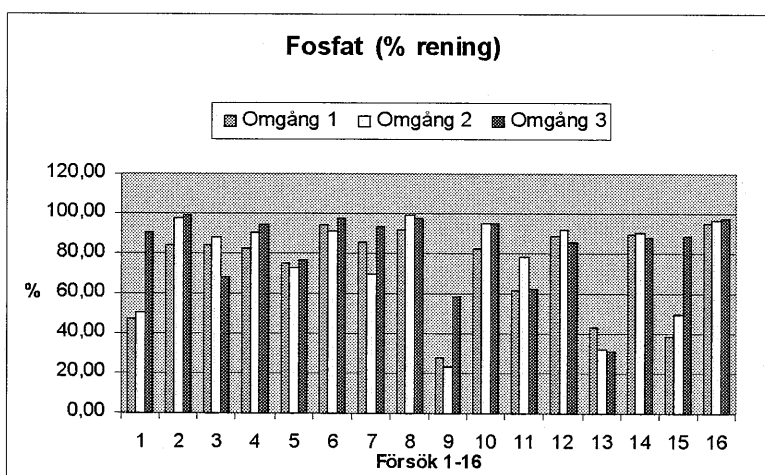


Diagram 13. Procentuell fosfatrening

I tabell 21 visas de beräknade effekterna och de som gav signifikans var:

- pH: På hög nivå är fosfatreningen 30 % bättre
- Sulfid: På låg nivå är fosfatreningen 14 % bättre
- Sulfid + pH: På hög nivå är fosfatreningen 12 % bättre
- Syre: På hög nivå är fosfatreningen 10 % bättre
- pH + Syre: På låg nivå är fosfatreningen 10 % bättre

Normalfördelningsplotten av effekterna i diagram 14 visar samma signifikanta effekter. Interaktionen mellan pH och syre samt mellan pH och sulfid illustreras i bild 13 och 14.

Tabell 21. Effekter och signifikans vid procentuell rening av fosfat

	pH	syre	pH + syre	kalcium	pH + kalcium	syre + kalcium	pH+syre+kalcium	sulfid	pH + sulfid
Summa +	738,5	659,0	579,4	628,4	622,3	617,5	634,6	563,5	665,4
Summa -	498,1	577,5	657,1	608,2	614,2	619,0	601,9	673,0	571,1
Effekt	30,1	10,2	-9,7	2,5	1,0	-0,2	4,1	-13,7	11,8
Effekt+2effektst.av	36,9	17,1	-2,8	9,4	7,9	6,7	10,9	-6,8	18,7
Effekt-2effektst.av	23,2	3,3	-16,6	-4,3	-5,8	-7,1	-2,8	-20,5	4,9
Signifikans	X	X	X					X	X

	syre + sulfid	pH syre sulfid	kalcium sulfid	pH kalcium sulfid	syre kalcium sulfid	pH syre kalcium sulfid
Summa +	636,84	607,56	604,58	629,67	620,75	618,70
Summa -	599,68	628,96	631,94	606,85	615,78	617,82
Effekt	4,65	-2,68	-3,42	2,85	0,62	0,11
Effekt+2effektst.av	11,51	4,18	3,44	9,71	7,48	6,97
Effekt-2effektst.av	-2,21	-9,54	-10,28	-4,01	-6,24	-6,75
Signifikans						

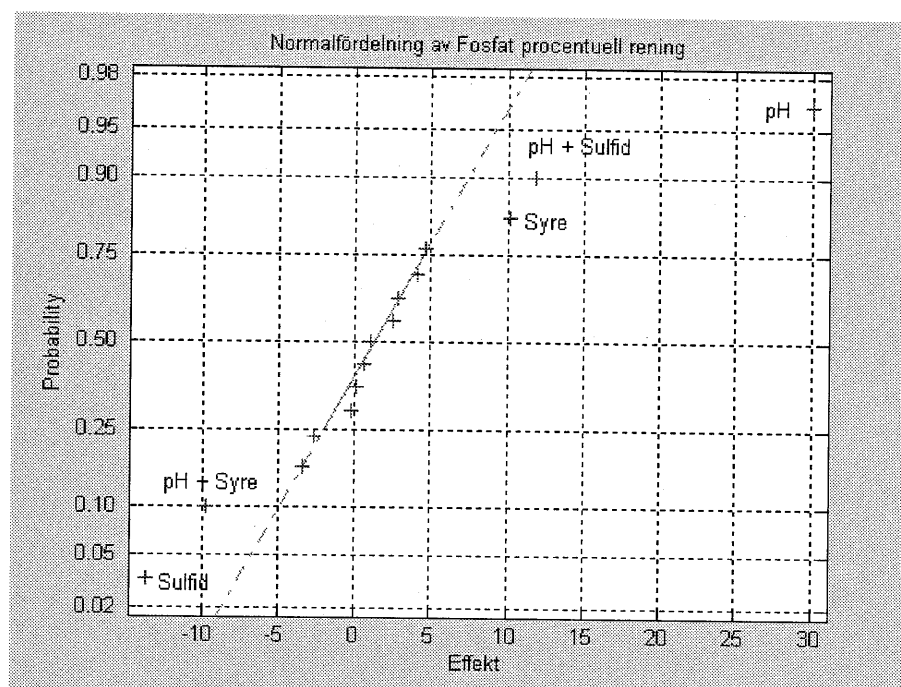


Diagram 14. Normalfördelningsplot av effekterna vid den procentuella reningen av fosfat

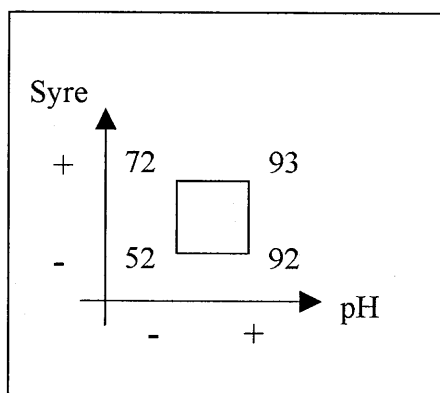


Bild 13. Interaktion pH Syre, fosfat.

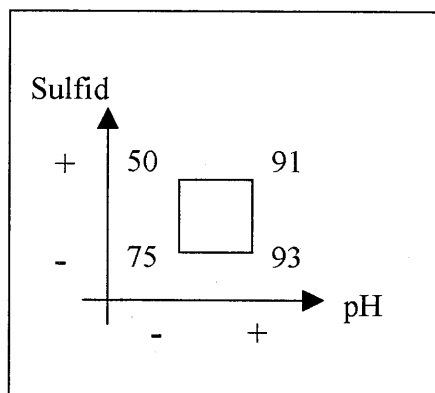


Bild 14. Interaktion pH Sulfid, fosfat.

Interaktionen mellan pH och syre visar att bäst rening uppnås vid god tillgång på syre i kombination med högt pH. Interaktionen mellan pH och sulfid visar att bäst rening uppnås vid en låg nivå av sulfid i kombination med högt pH. I båda fallen dominerar inverkan av pH när pH-nivån är hög. När pH-nivån är 6,5 får däremot sulfiden och syret betydligt större inverkan.

7.3 Totalfosfor, filtrerat

Halterna av totalfosfor i filtrerade prover har analyserats utifrån den procentuella minskningen av totalfosforhalten i det behandlade vattnet i förhållande till halten i det obehandlade enligt ekvation 16.

$$(\text{mg P/l före} - \text{mg P/l efter}) / \text{mg P/l före} \quad (16)$$

Den procentuella skillnaden visade sig vara likartad vid de tre försöksomgångarna, se diagram 15.

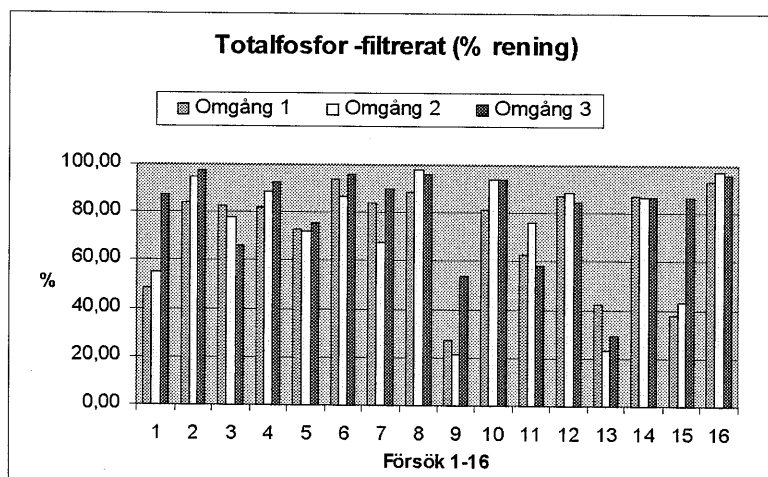


Diagram 15. Procentuell totalfosforrening filtrerade prover

I tabell 22 visas de beräknade effekterna och de som gav signifikans var:

- pH: På hög nivå är reningen av totalfosfor 31 % bättre
- Sulfid: På låg nivå är reningen av totalfosfor 14 % bättre
- Sulfid + pH: På hög nivå är reningen av totalfosfor 12 % bättre
- Syre: På hög nivå är reningen av totalfosfor 10 % bättre
- pH + Syre: På låg nivå är reningen av totalfosfor 9 % bättre

Normalfördelningsplotten av effekterna i diagram 16 visar samma signifikanta effekter. Interaktionen mellan pH och syre samt mellan pH och sulfid illustreras i bild 15 och 16.

Tabell 22. Effekter och signifikans vid procentuell rening av totalfosfor

	pH	syre	pH + syre	kalcium	pH + kalcium	syre + kalcium	pH+syre+kalcium	sulfid	pH + sulfid
Summa +	725,5	642,4	566,7	610,1	607,9	605,5	618,0	546,3	652,8
Summa -	480,4	563,5	639,3	595,8	598,0	600,5	587,9	659,6	553,1
Effekt	30,6	9,9	-9,1	1,8	1,2	0,6	3,8	-14,2	12,5
Effekt+2effektst.av	37,1	16,4	-2,6	8,3	7,7	7,1	10,3	-7,7	18,9
Effekt-2effektst.av	24,2	3,4	-15,6	-4,7	-5,3	-5,9	-2,7	-20,7	6,0
Signifikans	X	X	X					X	X

	syre + sulfid	pH syre sulfid	kalcium sulfid	pH kalcium sulfid	syre kalcium sulfid	pH syre kalcium sulfid
Summa +	625,71	588,25	589,05	615,80	604,43	606,98
Summa -	580,23	617,69	616,89	590,14	601,51	598,96
Effekt	5,68	-3,68	-3,48	3,21	0,36	1,00
Effekt+2effektst.av	12,18	2,81	3,01	9,70	6,85	7,49
Effekt-2effektst.av	-0,81	-10,17	-9,97	-3,28	-6,13	-5,49
Signifikans						

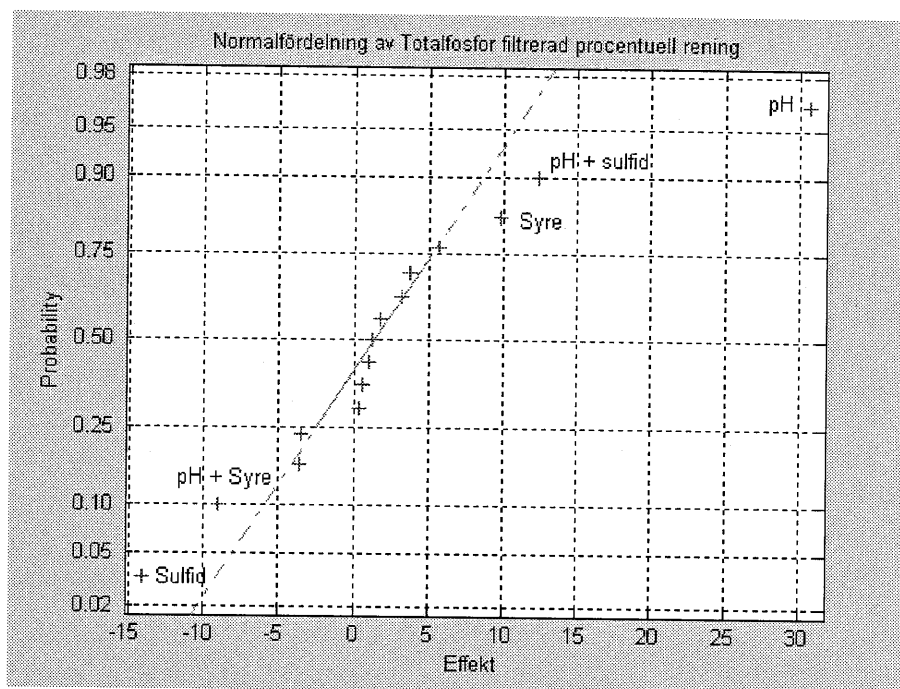


Diagram 16. Normalfördelningsplot av effekterna vid den procentuella reningen av totalfosfor

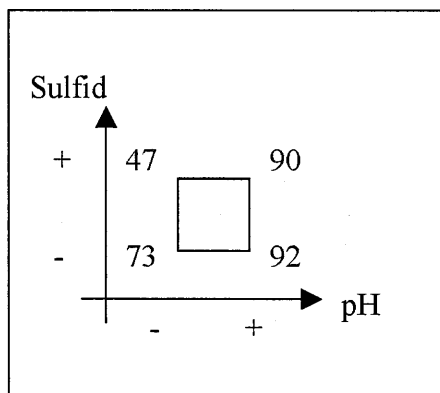


Bild 15. Interaktion pH Sulfid, TotP filtrerat.

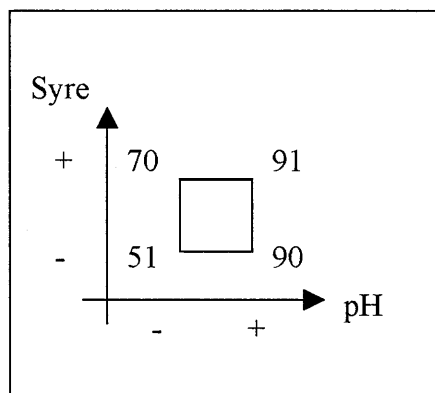


Bild 16. Interaktion pH Syre, TotP filtrerat.

Interaktionen mellan pH och sulfid visar att bäst rening uppnås vid en låg nivå av sulfid i kombination med högt pH. Interaktionen mellan pH och syre visar att bäst rening uppnås vid god tillgång på syre i kombination med högt pH. Liksom vid analysen av den procentuella reningen av fosfat visar sig pH vara dominerande när pH-nivån är hög men vid en låg nivå är inverkan av syre och sulfid stor.

7.4 Totalfosfor, ofiltrerat

Halterna av totalfosfor i ofiltrerade prover har analyserats utifrån den procentuella minskningen av totalfosforhalten i det behandlade vattnet i förhållande till halten i det obehandlade enligt ekvation 17.

$$(\text{mg P/l före} - \text{mg P/l efter}) / \text{mg P/l före} \quad (17)$$

Reningen av totalfosfor i det ofiltrerade vattnet var sämre än i det filtrerade vattnet. Den procentuella skillnaden visade sig vara betydligt lägre i omgång ett än i omgång två och tre, se diagram 17. Detta beror antagligen på att avskiljningen av SS i omgång ett var dålig, se kapitel 7.1. Eftersom omgång ett avvek så mycket sker här endast beräkningarna utifrån omgång två och tre.

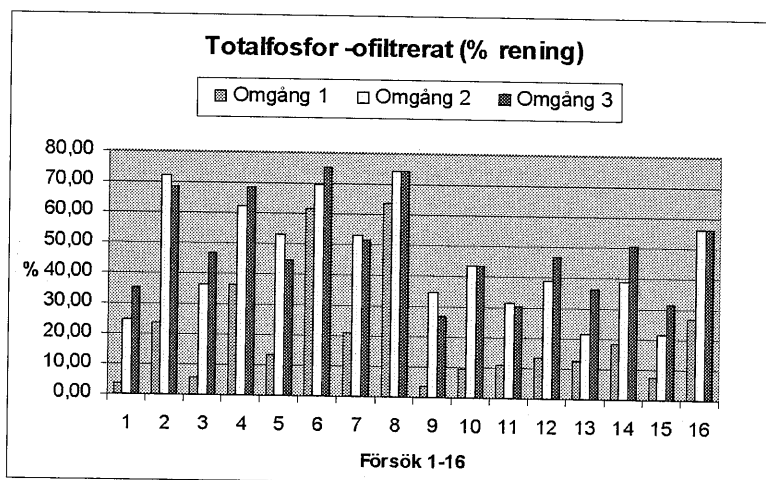


Diagram 17. Procentuell totalfosforrening ofiltrerade prover

I tabell 23 visas de beräknade effekterna och de som gav signifikans var:

- pH: På hög nivå är reningen av totalfosfor 22 % bättre
- Sulfid: På låg nivå är reningen av totalfosfor 19 % bättre
- Kalcium: På hög nivå är reningen av totalfosfor 6 % bättre
- pH + sulfid: På låg nivå är reningen av totalfosfor 5 % bättre
- pH + kalcium + sulfid: På hög nivå är reningen av totalfosfor 5 % bättre
- Kalcium + sulfid: På låg nivå är reningen av totalfosfor 4 % bättre
- pH + syre + sulfid: På hög nivå är reningen av totalfosfor 4 % bättre

Tabell 23. Effekter och signifikans vid procentuell rening av totalfosfor

	pH	syre	pH + syre	kalcium	pH + kalcium	syre + kalcium	pH+syre+kalcium	sulfid	pH + sulfid
Summa +	470,0	391,1	377,8	405,2	381,6	384,5	395,2	305,7	360,9
Summa -	290,9	369,9	383,1	355,8	379,4	376,5	365,8	455,3	400,1
Effekt	22,4	2,7	-0,7	6,2	0,3	1,0	3,7	-18,7	-4,9
Effekt+2effektst.av	26,3	6,5	3,2	10,1	4,1	4,9	7,5	-14,8	-1,0
Effekt-2effektst.av	18,5	-1,2	-4,5	2,3	-3,6	-2,9	-0,2	-22,6	-8,8
Signifikans	X			X				X	X
	syre + sulfid	pH syre sulfid	kalcium sulfid	pH kalcium sulfid	syre kalcium sulfid	pH syre kalcium sulfid			
Summa +	378,91	396,31	364,22	400,21	385,72	380,35			
Summa -	382,06	364,66	396,74	360,75	375,24	380,61			
Effekt	-0,39	3,96	-4,06	4,93	1,31	-0,03			
Effekt+2effektst.av	3,48	7,83	-0,20	8,80	5,18	3,84			
Effekt-2effektst.av	-4,26	0,09	-7,93	1,06	-2,56	-3,90			
Signifikans		X	X	X					

Normalfördelningsplotten av effekterna i diagram 18 visar att pH, kalcium + sulfid, pH + sulfid samt sulfid påverkar reningen av totalfosfor. Eftersom pH + kalcium + sulfid och pH + syre + sulfid inte utmärker sig i grafen studeras interaktionen endast för kombinationen av kalcium och sulfid samt mellan pH och sulfid, se bild 17 och 18.

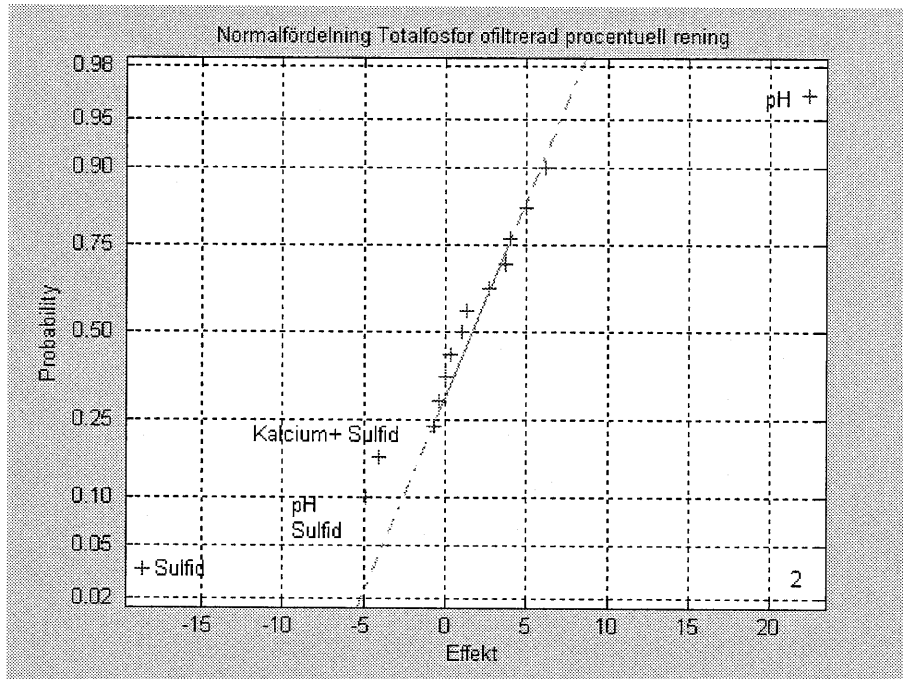


Diagram 18. Normalfördelningsplot av effekterna vid den procentuella reningen av totalfosfor

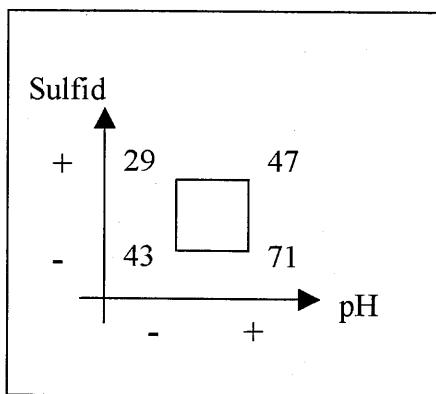


Bild 17. Interaktion pH Sulfid, TotP filtrerat.

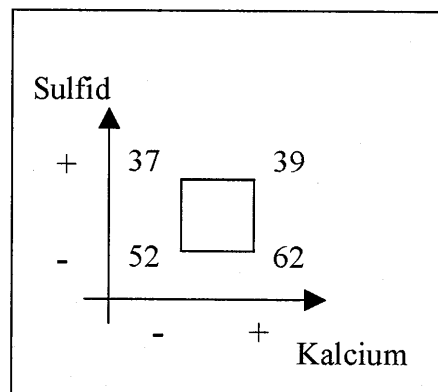


Bild 18. Interaktion Sulfid Kalcium, TotP filtrerat.

Interaktionen mellan pH och sulfid visar att bäst rening uppnås vid en låg nivå av sulfid i kombination med högt pH. I detta fall är inte pH lika dominerande som vid fosfat och filtrerat totalfosfor. Interaktionen mellan sulfid och kalcium visar att en hög nivå av kalcium och en låg nivå av sulfid ger bäst rening.

7.5 Totaljärn

Vid analys av totaljärn beräknades den procentuella minskningen av totaljärn i det behandlade vattnet i förhållande till halten vid försökens start. Järnhalten vid försökens start är summan av bakgrundhalten av järn, som var väldigt låg, och doseringen av järn, se ekvation 18.

$$((\mu\text{g Fe/l före} + \text{dosering}) - \mu\text{g Fe/l efter})/(\mu\text{g Fe/l före} + \text{dosering}) \quad (18)$$

Den procentuella minskningen av järn visade sig vara oerhört hög i samtliga försök. Effekten av pH visade sig avvika från de övriga men effekten är oerhört liten, 0,6 % bättre vid en hög pH-nivå, vilket kan ses i diagram 19.

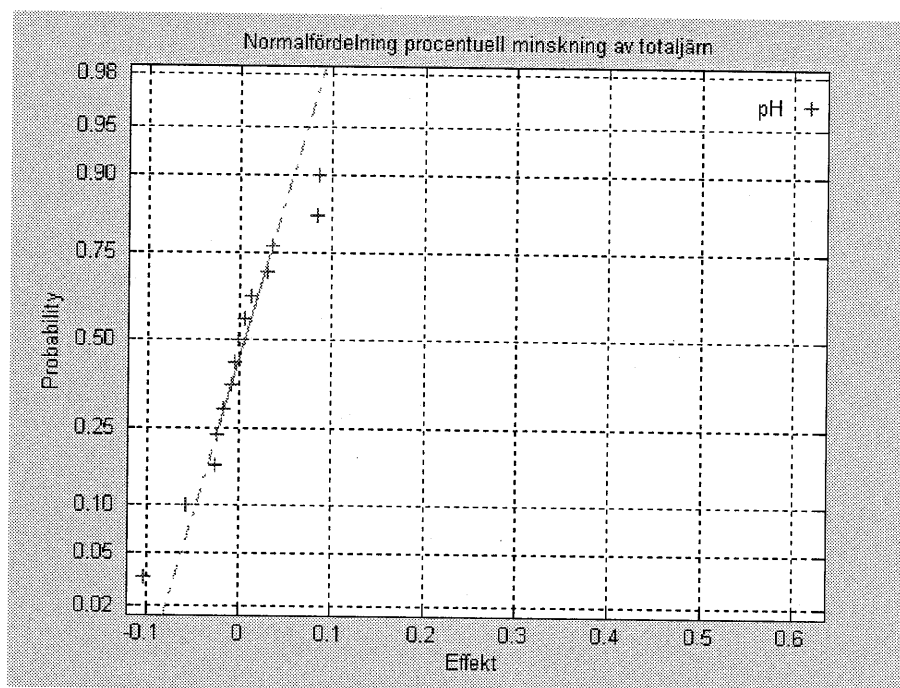


Diagram 19. Normalfördelningsplot av effekterna vid den procentuella minskningen av totaljärn

Vid en jämförelse av de uppmätta halterna i de sexton försöken konstateras trots allt att det finns variationer, se diagram 20. Eftersom doseringen av järn är betydande i förhållande till bakgrunds nivåerna av järn och doseringen varierar mellan de olika försöksomgångarna bestämdes att varje omgång skulle studeras separat. Doseringen av järn redovisas i tabell 24.

Tabell 24. Järndosering vid de olika försöken

	Omgång 1		Omgång 2		Omgång 3	
	Dag 1	Dag 2	Dag 1	Dag 2	Dag 1	Dag 2
Järndosering ug/l	6836	6696	8440	8858	10811	10602

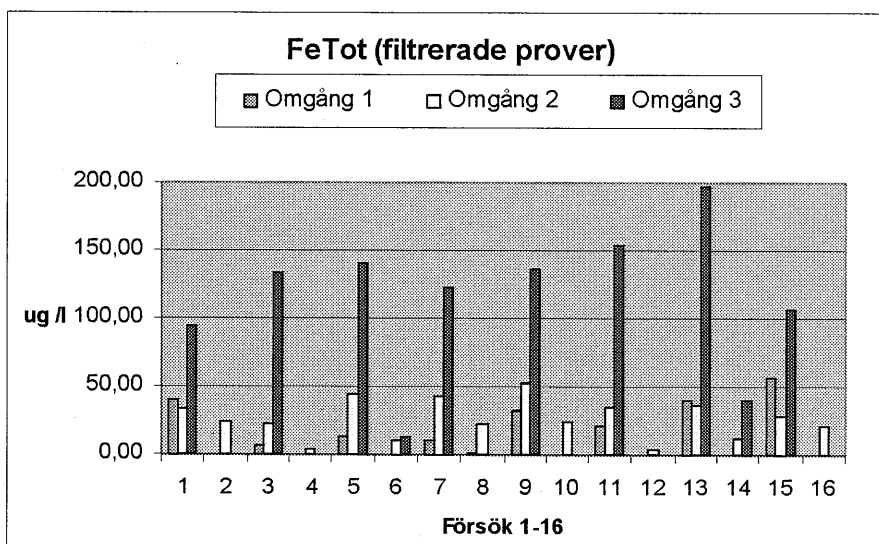


Diagram 20. Uppmätta halter av totaljärn i behandlat vatten

I diagram 19 konstateras att pH har inverkan på hur mycket järn som finns kvar i vattnet efter behandling. Detta samband syns även tydligt vid studien av de enskilda försöksomgångarna. I diagram 21 plottas de 16 försöken i omgång tre utifrån den järnhalt som uppmättes i det behandlade vattnet. Diagrammet visar tydligt att lägst järnhalter återfinns i de försök där försöksnumret är jämnt, dessa försök har en hög pH nivå gemensamt. Diagram för omgång ett och två visar samma trend.

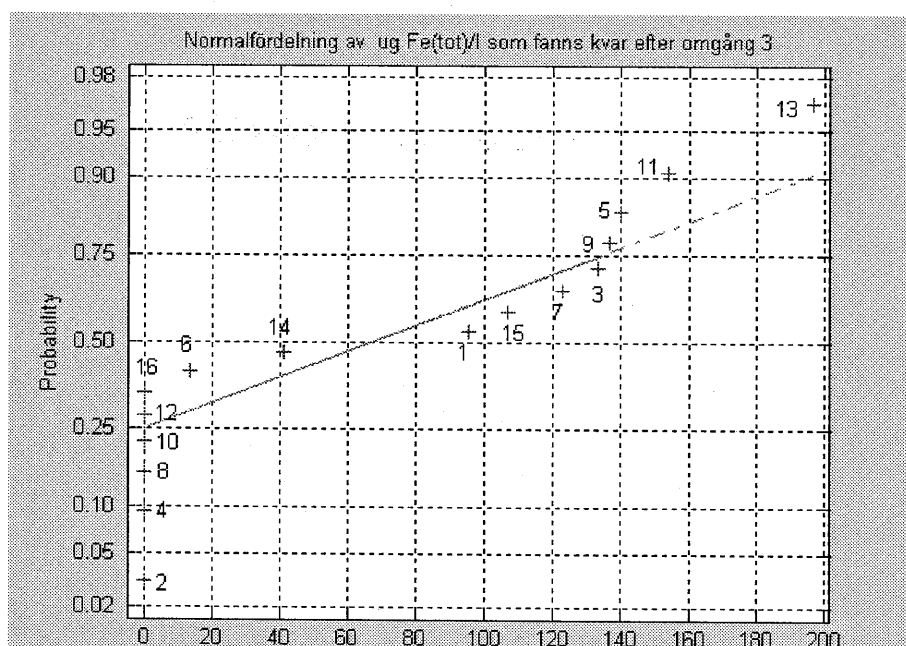


Diagram 21. Uppmätta halter av totaljärn i behandlat vatten

Studien av de enskilda omgångarna visar att även andra parametrar har effekt. För att avgöra om effekterna är signifikanta har den alternativa metoden som beskrivs i kapitel 6.2 använts. För omgång ett redovisas effekterna i tabell 25 och pH visar sig vara signifikant. Normalfördelningsplotten i diagram 22 visar att förutom pH har även sulfid inverkan.

Tabell 25. Effekter och signifikans vid omgång ett.

	pH	syre	pH + syre	kalций	pH + kalций	syre + kalций	pH+syre+kalций	sulfid	pH + sulfid
Summa +	1,0	97,7	127,4	122,8	102,2	142,3	82,8	151,6	71,5
Summa -	223,1	126,4	96,7	101,2	121,8	81,8	141,3	72,5	152,6
Effekt	-27,8	-3,6	3,8	2,7	-2,4	7,6	-7,3	9,9	-10,1
Effekt+2effektst.av	-13,8	10,4	17,8	16,7	11,5	21,5	6,7	23,9	3,8
Effekt-2effektst.av	-41,7	-17,6	-10,1	-11,3	-16,4	-6,4	-21,3	-4,1	-24,1
Signifikans	X								

	syre + sulfid	pH syre sulfid	kalций sulfid	pH kalций sulfid	syre kalций sulfid	pH syre kalций sulfid
Summa +	132,14	90,95	143,58	79,51	110,40	112,69
Summa -	91,95	133,14	80,51	144,58	113,69	111,40
Effekt	5,02	-5,27	7,88	-8,13	-0,41	0,16
Effekt+2effektst.av	18,99	8,70	21,85	5,84	13,56	14,13
Effekt-2effektst.av	-8,95	-19,24	-6,09	-22,10	-14,38	-13,81
Signifikans						

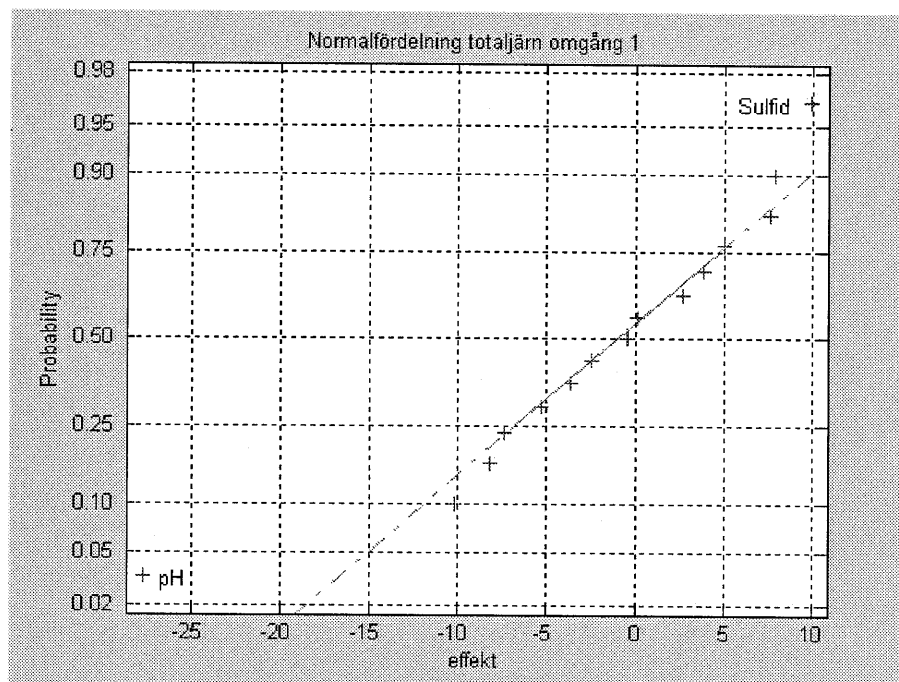


Diagram 22. Normalfördelningsplot av effekter för omgång ett.

För omgång två redovisas effekterna i tabell 26 och de signifikanta effekterna är pH och syre+kalcium. Normalfördelningsplotten i diagram 23 är svårtolkad men det är pH som utmärker sig främst.

Tabell 26. Effekter och signifikans vid omgång två.

	pH	syre	pH + syre	kalcium	pH + kalcium	syre + kalcium	pH+syre+kalcium	sulfid	pH + sulfid
Summa +	125,4	181,0	219,5	218,4	211,6	251,2	230,8	215,0	205,9
Summa -	295,5	239,9	201,4	202,5	209,3	169,6	190,0	205,9	215,0
Effekt	-21,3	-7,4	2,3	2,0	0,3	10,2	5,1	1,1	-1,1
Effekt+2effektst.av	-11,3	2,6	12,2	11,9	10,2	20,1	15,0	11,1	8,8
Effekt-2effektst.av	-31,2	-17,3	-7,7	-7,9	-9,6	0,3	-4,8	-8,8	-11,1
Signifikans	X					X			

	syre + sulfid	pH syre sulfid	kalcium sulfid	pH kalcium sulfid	syre kalcium sulfid	pH syre kalcium sulfid
Summa +	202,50	216,10	183,23	237,64	209,30	209,30
Summa -	218,37	204,77	237,64	183,23	211,57	211,57
Effekt	-1,98	1,42	-6,80	6,80	-0,28	-0,28
Effekt+2effektst.av	7,94	11,34	3,12	16,72	9,64	9,64
Effekt-2effektst.av	-11,90	-8,50	-16,72	-3,12	-10,20	-10,20
Signifikans						

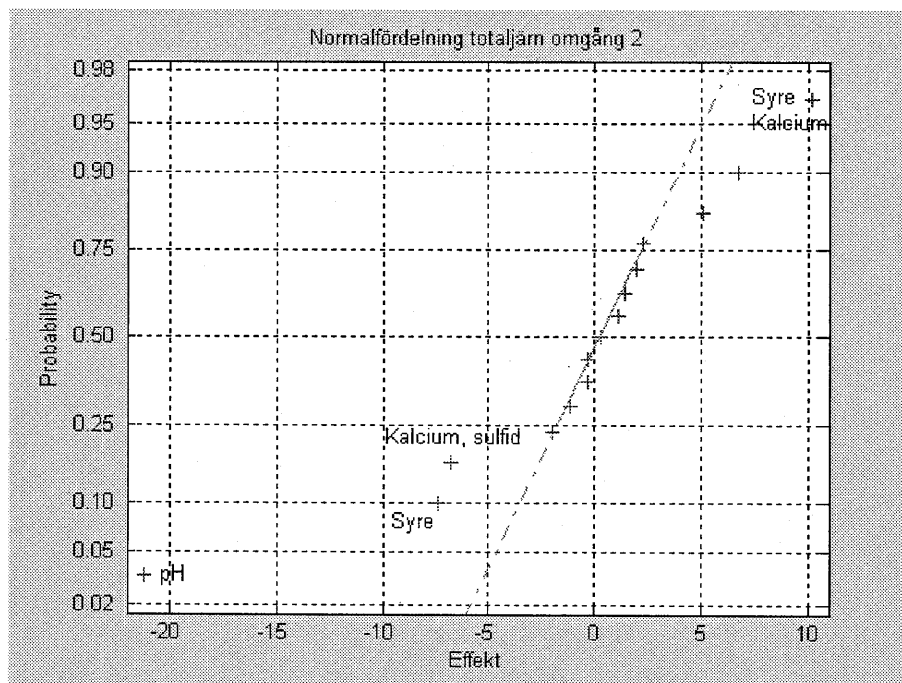


Diagram 23. Normalfördelningsplot av effekter för omgång två.

För omgång tre redovisas effekterna i tabell 27 och förutom pH är även effekten för syre + kalcium signifikant. I normalfördelningsplotten i diagram 24 ses att förutom pH har även sulfid inverkan.

Tabell 27. Effekter och signifikans vid omgång tre.

	pH	syre	pH + syre	kalcium	pH + kalcium	syre + kalcium	pH+syre+kalcium	sulfid	pH + sulfid
Summa +	54,2	517,0	568,9	620,8	573,5	461,6	624,3	635,3	532,5
Summa -	1086	623,1	571,2	519,3	566,6	678,5	515,8	504,8	607,6
Effekt	-129,0	-13,3	-0,3	12,7	0,9	-27,1	13,6	16,3	-9,4
Effekt+2effektst.av	-106,0	9,7	22,7	35,6	23,8	-4,2	36,5	39,3	13,6
Effekt-2effektst.av	-151,9	-36,2	-23,2	-10,3	-22,1	-50,1	-9,4	-6,7	-32,3
Signifikans	X					X			

	syre + sulfid	pH syre sulfid	kalcium sulfid	pH kalcium sulfid	syre kalcium sulfid	pH syre kalcium sulfid
Summa +	509,46	602,95	572,94	594,87	530,23	582,17
Summa -	630,65	537,16	567,17	545,24	609,87	557,93
Effekt	-15,15	8,22	0,72	6,20	-9,96	3,03
Effekt+2effektst.av	7,80	31,18	23,68	29,16	13,00	25,98
Effekt-2effektst.av	-38,10	-14,73	-22,23	-16,75	-32,91	-19,92
Signifikans						

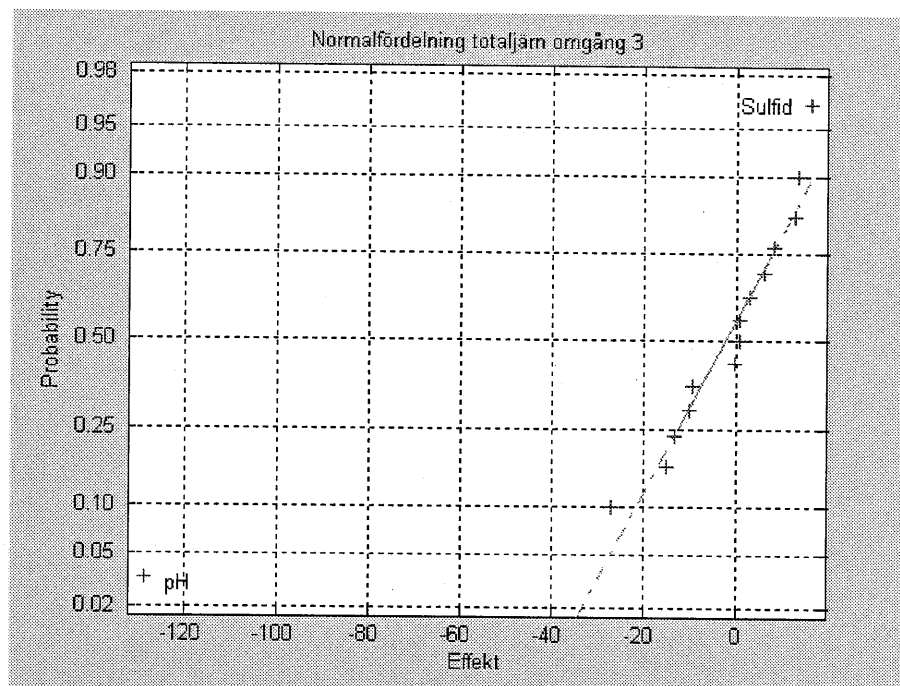


Diagram 24. Normalfördelningsplot av effekter för omgång tre.

Sammanfattningsvis konstateras att pH gav utslag i samtliga omgångar. I omgång två och tre gav kombinationen av syre och kalcium signifikans vid beräkningar. Interaktionen vid de båda omgångarna visas i bild 19 och 20 men dessa visar inte på några gemensamma samband.

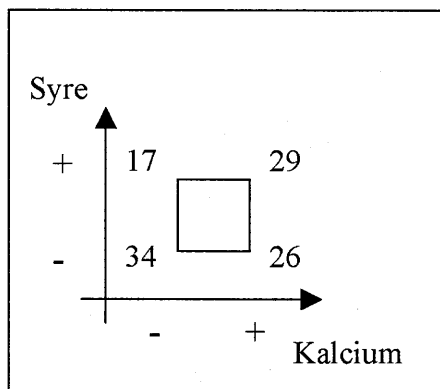


Bild 19. Interaktion Syre Kalcium
Omgång 2, Jäm

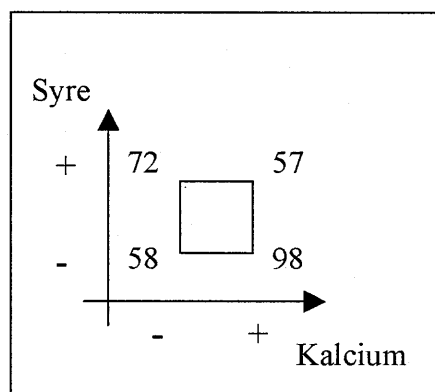


Bild 20. Interaktion Syre Kalcium
Omgång 3, Jäm

7.6 pH

Försöken analyserades utifrån den pH förändring som uppmättes efter försökens slut i förhållande till pH värdet före (8 eller 6,5). Vid analysen av pH har 2⁴ försöket uppdelats till två 2³ försök eftersom det är så stora skillnader i den pH-förändring som sker under försökets gång. Åtta av försöken utmärks av att pH-värdet vid start är 8 och här sker en pH-sänkning och för de övriga åtta är startvärdet 6,5 och här sker istället en pH-höjning, se diagram 25.

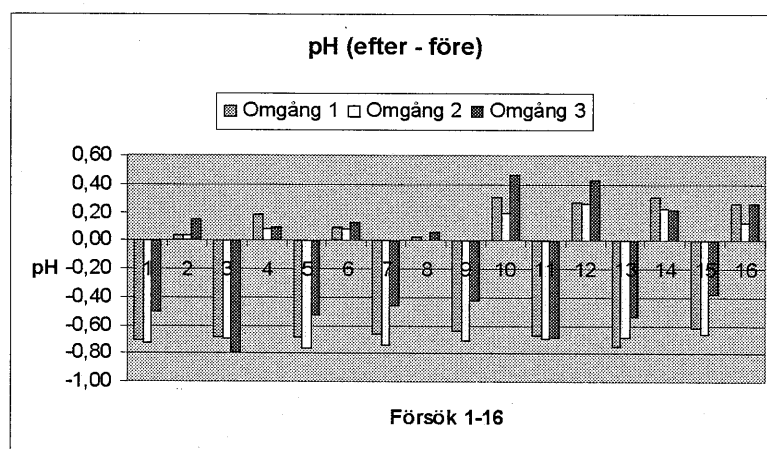


Diagram 25. pH förändringar vid försök 1-16.

Vid pH 8 visade det sig att effekten av en sulfidförändring var liten men signifikant, se tabell 28. En förändring av sulfid från en hög till låg nivå medför att pH sänkningen under behandlingen ökar med 0,15 pH enheter. Signifikansen syns även i diagram 26.

Tabell 28. Effekter och signifikans vid pH 8

	syre	kalcium	syre + kalcium	sulfid	syre + sulfid	kalcium sulfid	syre kalcium sulfid
Summa +	-2,18	-2,22	-2,19	-1,86	-2,16	-2,10	-2,16
Summa -	-2,15	-2,11	-2,13	-2,47	-2,16	-2,22	-2,17
Effekt	-0,01	-0,03	-0,02	0,15	0,00	0,03	0,00
Effekt+2effektst.av	0,03	0,01	0,02	0,19	0,04	0,07	0,04
Effekt-2effektst.av	-0,05	-0,07	-0,05	0,12	-0,04	-0,01	-0,03
Signifikans				X			

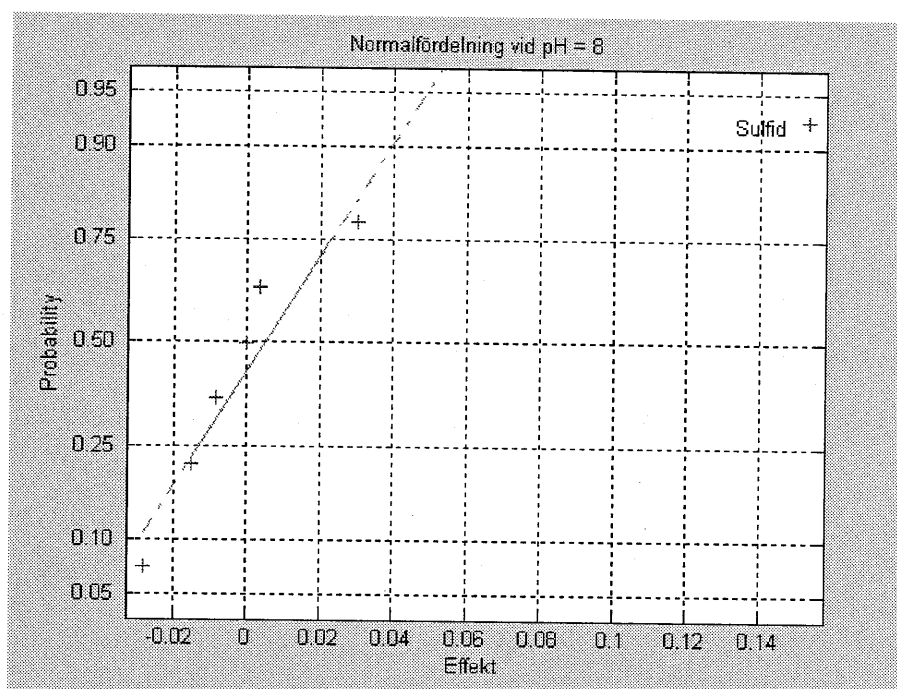


Diagram 26. Normalfördelningsplot av effekter vid pH 8

Vid pH 6,5 visade det sig att effekterna vid förändring av syre och sulfid var små men signifikanta, se tabell 29. Normalfördelningsplotten är svårtolkad men sulfid finns även här med i bilden, se diagram 27.

Tabell 29. Effekter och signifikans vid pH 6,5

	syre	kalcium	syre + kalcium	sulfid	syre + sulfid	kalcium sulfid	syre kalcium sulfid
Summa +	0,37	0,30	0,31	0,42	0,32	0,26	0,30
Summa -	0,22	0,29	0,28	0,17	0,27	0,33	0,29
Effekt	0,04	0,00	0,01	0,06	0,01	-0,02	0,00
Effekt+2effektst.av	0,06	0,03	0,03	0,08	0,03	0,01	0,03
Effekt-2effektst.av	0,01	-0,02	-0,01	0,04	-0,01	-0,04	-0,02
Signifikans	X			X			

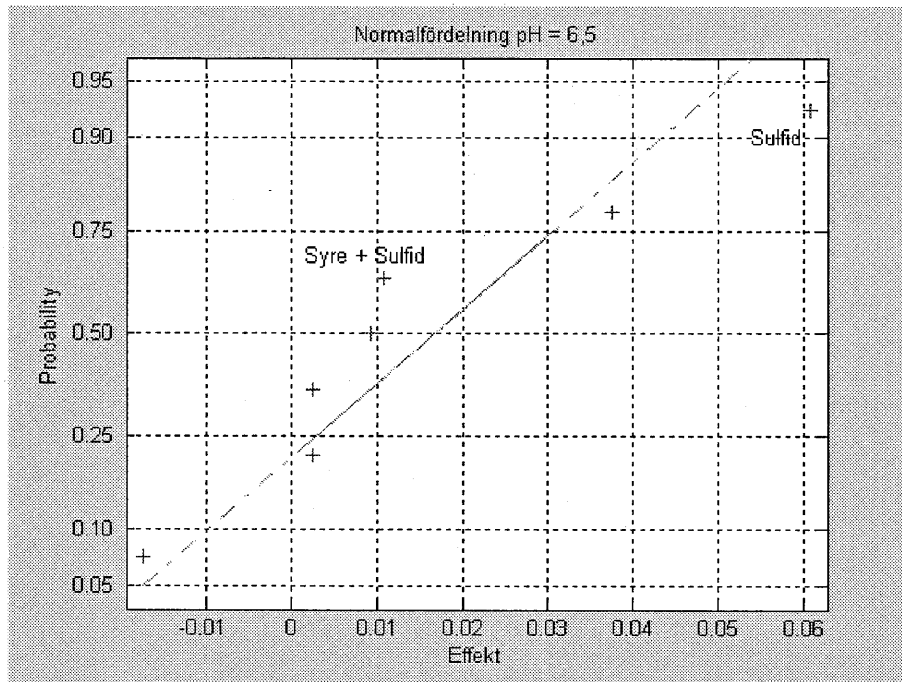


Diagram 27. Normalfördelningsplot av effekter vid pH 6,5

Sulfid verkar ha inverkan på förändringen av pH både då pH är 8 och 6,5. En sammanställning av inverkan visas i bild 21. Vid ett lågt pH är inverkan mindre än vid ett högt pH. Detta beror på att vattnets buffertkapacitet är lägre vid pH 8. En hög nivå av sulfid höjer pH detta trots att mer sulfidlösning då tillsattes och lösningen var mycket sur.

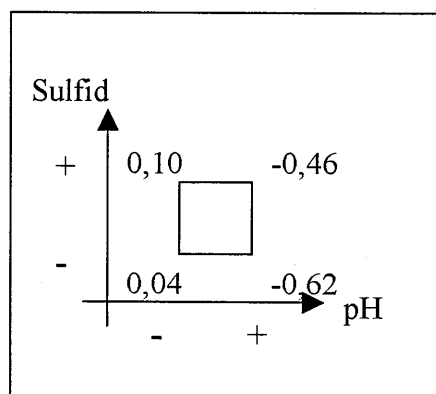


Bild 21. Interaktion Sulfid pH

7.7 Diskussion

De fyra parametrarna och kombinationer av dessa har analyserats utifrån de olika mätningarna som utförts. Genom att jämföra en parameters inverkan på de olika mätningarna kan en uppfattning fås om hur parametern påverkar reningsprocessen.

pH hade en stor inverkan på reningen. Störst påverkan har pH på de fraktioner som är lösta. För fosfat och totalfosfor filtrerat ger ett högt pH en mycket bra rening oberoende av t.ex. sulfid och syrehalt. Är pH däremot lågt spelar nivåerna av de andra parametrarna en större roll. För totalfosfor ofiltrerat är ett högt pH inte alls lika dominerande.

Sulfid påverkar främst den partikulära reningen. En hög sulfidhalt gav sämre avskiljning av SS och totalfosfor ofiltrerat. Mätningen av järn var svår för att koncentrationerna var så låga. Beräkningarna visade inte att sulfiden hade en statistiskt signifikant effekt på hur mycket järn som fanns kvar efter behandling men mätningarna visar ändå att halten ofta är som högst i de fall där sulfidnivån varit hög.

Syre gav inte så stor inverkan som väntat. Syre hade effekt på reningen av fosfat och totalfosfor filtrerat men då i kombination med pH och främst då pH var lågt. Relativt lite syre åtgår för att oxidera Fe(II) till Fe(III). Eftersom syreöverföring även skedde genom vattenytan var det förmodligen tillräckligt för att oxidera järnet. Vid luftning med tryckluft syresattes vattnet mycket snabbare, vilket borde vara speciellt viktigt vid ett lågt pH då järnoxidationen går långsammare, och det kan vara den främsta anledningen till att bättre resultat genomgående uppnåddes.

Kalcium hade mer effekt på partikulära reningen och gav effekt på avskiljningen av totalfosfor ofiltrerat i kombination med sulfid. Kalcium har effekt på fällningen av fosfor både genom att det binder in i kemiska utfällningar med metalljon och fosfat (avsnitt 4.3.5, ekvation 8) samt att det neutraliserar negativa laddningar på kolloider och förbättrar därigenom destabiliseringen av dessa. De uppnådda resultaten tyder på att den senare processen är av större betydelse vid de undersökta förhållandena eftersom kalciumet hade en större effekt på reduktionen av partikulärt material. Vid behandlingen syntes tydligt att vattnet vid en hög kalciumnivå blev betydligt klarare än i de med låg kalciumhalt. Trots detta syntes inga skillnader vid mätningarna av SS. Detta kan förklaras med att små kolloider destabiliserades och kunde därigenom inkorporeras i flockar. Att det inte syntes vid mätningar av SS kan bero på att kolloiderna är för små för att fastna i filtrerpapperet som har en relativt stor pordiameter. Reduktionen av kolloider kan eventuellt bättre mätas genom tex. turbiditet.

Resultaten ovan måste tolkas i sitt rätta sammanhang. Målsättningen vid ett faktorförsök är att förhållandena under försöket skall vara likvärdiga förutom just de parametrar som ska varieras. För att kunna säkerställa att variationer i mätresultaten inte är tillfälliga repeteras varje försök tre gånger vilket i en 2⁴-studie som resulterar i 48 försök. Det idealiska genomförandet hade därför varit att köra alla 48 försök samtidigt med avloppsvatten som hämtats vid samma tidpunkt. Att klara av så många försök på två personer var omöjligt.

För att praktiskt kunna genomföra försöken användes i denna studie olika vatten vid de tre olika omgångarna. För att komma runt detta problem har vid analysen den procentuella reningen mellan omgångarna jämförts. Det finns en risk för att variationer i vattnets egenskaper som inte har uppmätts vid försökets start kan påverka reningen och därför ger missvisande resultat.

En annan felfaktor kan vara att vattnet innan vissa försök förvarades under ett dygn i ett kylskåp eftersom inte var möjligt att hinna med samtliga 16 försök under en arbetsdag. Denna effekt borde dock ha minimerats av att faktorförsöken gjordes i slumpartad ordning. Det bör även nämnas att bakgrunds nivåerna av kalcium och sulfid inte mättes i denna studie. Det är därför inte säkert att de koncentrationer som redovisas i tabell 29 verkligen rådde vid försöket, en eventuell bakgrunds nivå kan ha höjt den aktuella koncentrationen.

Det är viktigt att vara medveten om att de samband som konstateras i denna studie gäller för just det avloppsvattnet som används vid de tre försöksomgångarna. För att få en helhetsbild är det önskvärt att utföra fler försök och då gärna under en längre tidsperiod eftersom avloppsvattnets sammansättning varierar under året. En stor mängd data registreras kontinuerligt på Ryaverket idag. Det hade varit intressant om dessa mätningar kunde analyseras av ett statistiskt verktyg, på så vis kunde kanske okända samband upptäckas.

8. Slutsatser

Projektet inleddes med att söka efter lämpliga parametrar att undersöka i faktorförsök. Efter en litteraturstudie valdes sex möjliga parametrar ut. Två av dessa, EDTA och humus, visade sig inte påverka den kemiska fosforeringen. De övriga fyra; pH, kalcium, sulfid och syre, kom att ingå i faktorförsöken. Följande slutsatser kunde dras:

pH:

- SS: Vid en hög nivå är avskiljningen 19,7 % bättre.
- Fe (tot.): En hög pH-nivå resulterar i att mindre järn finns kvar i det behandlade vattnet.

Sulfid:

- SS: Vid en låg nivå är avskiljningen 18,3 % bättre.
- Sulfid påverkar pH nivån under försöket. Vid pH 8 motverkar sulfiden att pH under försökets gång sjunker. Vid pH 6,5 höjs alltid pH-nivån under försökets gång och en hög sulfidnivå förstärker denna höjning.

pH + syre:

- Fosfat: Bäst procentuell rening uppnås vid en kombination av hög pH-nivå och hög syrenivå, se bild 22. Vid en hög pH-nivå blir reningen god vid både hög och låg syrenivå. Är däremot pH-nivån låg blir reningen betydligt bättre vid en hög syrenivå.
- Totalfosfor filtrerat: Samma resultat som för fosfat.

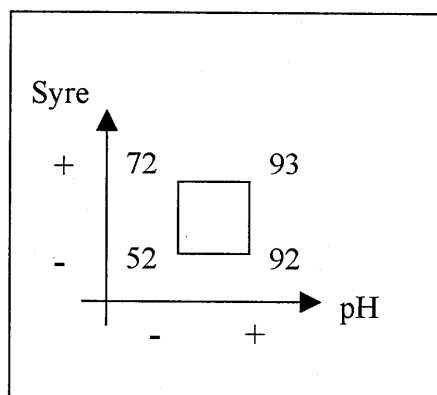


Bild 22. Interaktion fosfat, pH + Syre

pH + sulfid:

- Fosfat: Bäst procentuell rening uppnås vid en kombination av hög pH-nivå och låg sulfidnivå, se bild 23. Vid en hög pH-nivå blir reningen god vid både hög och låg sulfidnivå. Är däremot pH-nivån låg blir reningen betydligt bättre vid en låg sulfidnivå.
- Totalfosfor filtrerat: Samma resultat som för fosfat.
- Totalfosfor ofiltrerat: Bäst procentuell rening uppnås vid en kombination av hög pH-nivå och låg sulfidnivå, se bild 24. Vid en hög pH-nivå och hög sulfidnivå blir reningen ungefär densamma som vid lågt pH och låg sulfidnivå.

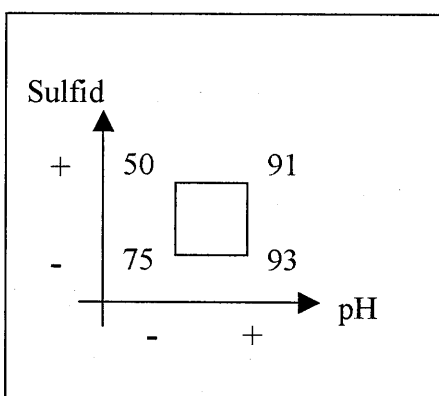


Bild 23. Interaktion fosfat, pH + Sulfid

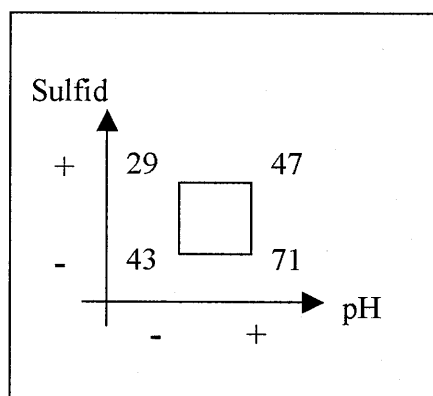


Bild 24. Interaktion P (tot.) ofiltrerat. pH + Sulfid

Sulfid + kalcium:

- Totalfosfor ofiltrerat: Bäst procentuell rening uppnås vid en kombination av hög kalciumnivå och låg sulfidnivå, se bild 25. En låg sulfidnivå ger bra rening vid de båda kalciumnivåerna.

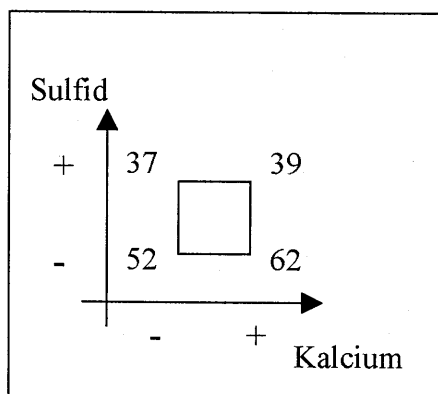


Bild 25. Interaktion P (tot.) ofiltrerat. Kalcium + Sulfid

9. Referenser

Box G. E. P., Hunter W. G., Hunter J. S. (1978). Statistics for experimenters. New York, John Wiley & Sons.

Clark T., Stephenson T., Pearce P. A. (1997). Phosphorus removal by chemical precipitation in a biological aerated filter. *Wat.Res* vol 31 no 10: 2557-2563.

Delgado S., Alvarez M., Rodriguez-Gomes L. E., Aguiar E. (1998). H₂S Generation in a reclaimed urban wastewater pipe. *Water Research* Vol. 33, No 2: 539-547

De-Bashan L. E., Bashan Y. (2004). Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer. *Water Research* 38: 4222-4246.

Devore J., Farnum N. (1999). Applied statistics for engineers and scientists. Pacific Grove, Brooks/Cole.

Gryaabs miljörapport 2003, Gryaab Rapport 2004:2

Henze M., Harremoës P., Jansen J., Arvin E. (2002). Wastewater Treatment, Biological and Chemical Processes, Third Edition. Berlin, Springer.

Kari F.G., Giger W. (1995). Speciation and fate of EDTA in municipal wastewater treatment. *Water Research* Vol 30, No 1: 122-134

Karlsson J., Krigsman T., Molander B. O., Wickman P. O. (1994). Biologi 1. Stockholm, Liber AB.

Komplexbildare. (2001). Svenska Naturskyddsföreningen, Bedömningsmall för BRA MILJÖVAL.

Remberger M. (2001). EDTA:s öde i miljön: interaktion med partikulärt material och sediment. IVL Rapport B1398, Svenska Miljöinstitutet.

Ridge A. C., Sedlak D. L. (2003). Effect of ferric chloride addition on the removal of Cu and Zn complexes with EDTA during municipal wastewater treatment. *Water Research*: 921-932.

Sala V. G. (2003). Phosphorus removal at the Rya wastewater treatment plant. Master Thesis 2003:15. Institutionen för Vatten Miljö och Transport Chalmers Tekniska Högskola.

Tchobanoglous G., Burton F. L. (1991). Wastewater engineering. Singapore, McGraw-Hill Inc.

Thistleton J., Clark T., Pearce P., Parsons S. A. (2001). Mechanisms of chemical phosphorus removal 1-Iron(II) Salt. *Trans IChemE*, vol 79, Part B.

Tipping E., Rey-Castro C., Bryan S. E., Hamilton-Taylor K. (2002). Al(III) and Fe(III) binding by humic substances in freshwaters, and implications for trace metal speciation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol 66, No, 18: 3211-3224

vanLoon G., Duffy S. (2000). *Environmental chemistry – a Global Perspective*. New York, Oxford University Press.

VA-teknik II V4, Kursmaterial, Vatten Miljö Transport CTH Göteborg 2004

VA-verket Göteborg. (2004). Råvatten och dricksvatten vid vattenverk kvartal 1-4/2004.

Williams I. (2001). *Environmental Chemistry*. Bath, John Wiley & Sons.

Internet referens

<http://www.kemwater.se> 050218

pH

Försök utfört 041202

Fosfat ofiltrerat 1,7 mg P/l (obehandlat vatten)

pH justerades i två burkar som syra användes 0,4 M HCl och som bas 4M NaOH. Järnsulfat tillsattes och sedan följde snabb omrörning under en minut varefter pH uppmättes igen.

Burk	Start pH	pH Efter
1	6,48	6,3
2	7,92	7,16

Slutsats: pH sjunker kraftigt vid högt start pH

Försök utfört 041209

Fosfat ofiltrerat 2,5 mg P/l (obehandlat vatten)

Fyra burkar. I två av burkarna sänktes pH till 6,5 och i de andra två höjdes det till 8,0. I en med lågt och en med högt pH luftades proven innan järnsulfat tillsattes. Efter luftning och järntillsats justerades pH till ursprungsnivån igen.

	Burk 1	Burk 2	Burk 3	Burk 4
Start pH	7,21	7,28	7,23	7,25
Justerat till	6,51	8,01	6,51	8,04
mängd bas/syra	3,1 ml	90 ul	3 ml	110 ul
pH efter luftning			6,61	8,02
Justerat till			6,5	-
mängd bas/syra			800 ul	0
pH efter Fe-dos	6,2	6,92	6,19	6,93
Justerat till	6,5	8,01	6,51	7,98
mängd bas	140 ul	230 ul	190 ul	240 ul

pH sjunker kraftigt när pH innan är högt. Det verkar inte rimligt att justera pH noggrant efter järndoseringen eftersom själva mätningen är tidskrävande och dessutom kräver omrörning vilket skulle påverka försöket till stor grad.

Försök utfört 041214

Fosfat ofiltrerat 3,25 mg P/l (obehandlat vatten)

Dos järnsulfat 840 µl

Metod: För att undvika att justera pH efter järndoseringen har vi försökt att förutse pH sänkningen som följer efter järnet. Sänkningen justeras med NaOH alternativt NaHCO₃.

Tillvägagångsätt: Mät pH, justera, tillsätt järn, tillsätt bas/alkali, speedmixing 400 varv/min, mät pH

Burk	Start pH	Efter pH	Mängd bas/syra	Tillsats	pH efter
1	7,33	8,09	80 ul	NaOH	7,47
2	7,37	7,98	80 ul	NaHCO ₃	7,02
3	7,39	6,52	3,6 ml	NaOH	6,52

Slutsats: NaOH är bra som pH höjare, Enkelt att tillsätta då en lite mängd tillsätts. Påverkar inte heller alkaliniteten.

Försök utfört 041215

Fosfat ofiltrerat 1 mg P/l (obehandlat vatten)

Dos järnsulfat 260 µl

Vi mätte även pH i jämlösningen till 0,17!

Vi måste nog ta hänsyn till dessa H⁺ då vi räknar.

Tillsats med hänsyn till felösningens låga pH. NaOH ca 26 % av Fe doseringen

Burk	Start pH	Efter pH	Mängd bas/syra	Tillsats	pH efter
1	6,85	8,02	80 ul	NaOH	7,42
2	6,9	6,47	1 ml	HCl	6,47

Slutsats: För den med lågt pH verkar denna tillsats fungera bra, men för den med högt pH sjunker den till c:a 7,5 vilket fortfarande är ett relativt högt pH. Vi tycker att det ska vara samma pH justering vid både högt och lågt pH för att inte tillsatserna i burkarna ska skiljas.

Beräkning till pH justeringen

Observera att detta är en överslagsberäkning!

1. Tillsats av järnsulfatlösning innehållande 0,25 mol/l Fe^{2+} skulle enligt överslaget nedan ge ett tillskott på 0,375 mol H^+ /l.

$$0,25 \text{ mol/l } Fe^{2+}$$



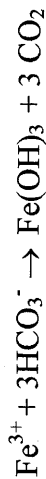
Tillskott 0,25 mol OH^- /l

$$0,125 \text{ mol/l } Fe^{3+}$$



Tillskott 0,25 mol H^+ /l

Antag 0,125 mol till varje reaktion



$$0,125 \text{ mol/l } Fe^{3+}$$

Tillskott 0,375 mol H^+ /l

2. Järnsulfatlösningen i sig är väldigt sur med en koncentration på 0,676 mol H^+ /l.

3. Sammanställt skulle en tillsats på 0,25 mol Fe^{2+} ge ett överskott på 1,051 mol H^+ /l.

4. 4 M NaOH motsvarar 4 mol OH^- /l . 1,051/4= 0,26

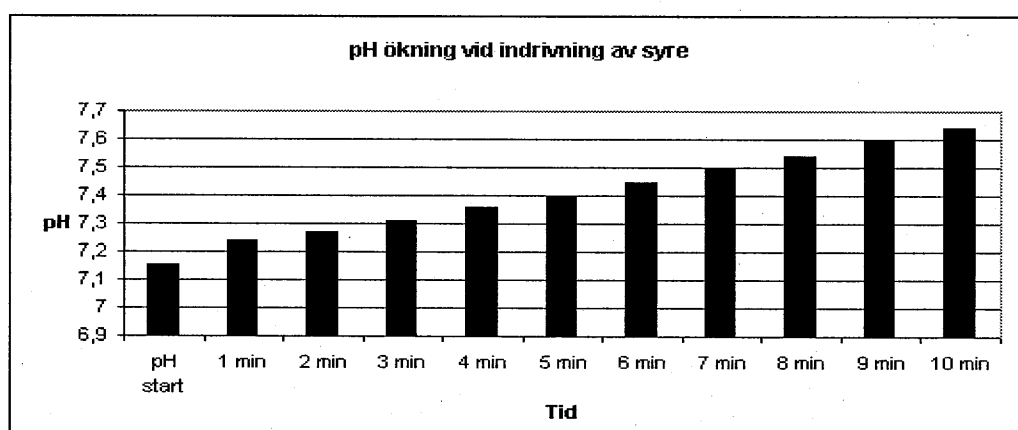
Koncentration av löst syre

Försök utfört 041209

Fosfat ofiltrerat 2,50 mg P/l (obehandlat vatten)

pH förändringen testas vid luftning.

pH start	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min
7,15	7,24	7,27	7,31	7,36	7,4	7,45
	7 min	8 min	9 min	10 min		
	7,5	7,54	7,6	7,64		



Test av syrets inverkan på fosforfällningen

Försök utfört 041124

A	Utan syre
B	Med syre

Luftning under en minut under speedmixing

OFILTRERADE PROVER (obeha)	Faktor	(mg P/l)
Fosfat (mg P/l)	0,5	5
Totalfosfor (mg P/l)	0,17	15

FILTRERADE PROVER (obehandlat)		Faktor	
Fosfat (mg P/l)	0,27	5	1,35
Totalfosfor (mg P/l)	0,13	12,5	1,625

Järndosering	0,65 ml
--------------	---------

Efter behandling

Prov		A			B; luftat prov		
		mätt	faktor	värde	mätt	faktor	värde
Fosfat	ofiltrerat	0,31	5	1,55	0,3	5	1,5
	filtrerat	0,13	5	0,65	0,06	2	0,12
Total P	ofiltrerat	0,67	5	3,35	0,42	5	2,1
	filtrerat	0,27	2,5	0,675	0,09	2,5	0,225

Rening i procent

Fosfat

A	B
0,52	0,91

Rening i procent

Totalfosfor

A	B
0,58	0,86

Syret drivs in i vattnet med hjälp av en glasstav som det satt en genomsläpplig sten som släppte igenom små bubblor så syret överfördes effektivt till vattnet.

Slusats: fosfatreningen blir mer effektiv med mer syre.

EDTA

Försök utfört 041220

Fosfat ofiltrerat 1,7 mg P/l (obehandlat vatten)
Dos järnsulfat 440 µl

Utförande: EDTA lösningen gjordes för att få 0,15 g EDTA / l och EDTA tillsätts innan järnsulfat. Två av burkarna täcktes med aluminiumfolie för att se om solljuset bröt ner EDTA.

Nivåer	Halt µl / l	Dosering
+	150	1 ml
-	20	133 µl

Burk		Fosfat efter (mg P/l)	% minskning
1	Täckt, +	1,36	20
2	Täckt, -	1,34	21
3	+	1,32	22
4	-	1,34	21
5	Blank	1,36	20

Slutsats: Ingen skillnad på fosforeringen!

Försök utfört 041220

Fosfat ofiltrerat 1,7 mg P/l (obehandlat vatten)
Dos järnsulfat 440 µl

Utförande: Försöker med mer EDTA ur samma lösning och lågt pH för det gynnar FeEDTA bildningen.

Burk	EDTA	Fosfat efter (mg P/l)	% minskning
1	2 ml	1,4	18
2	3 ml	1,34	21
3	4 ml	1,4	18
4	3 ml, pH 6,5	1,5	12
5	pH 6,5	1,44	15

Slutsats: Skillnaden på procentuell rening blev marginell.

Appendix 3 2(2)

Försök utfört 050113

Fosfat ofiltrerat 0,75 mg P/l (obehandlat vatten)
Dos järnsulfat 195 µl

Utförande: Undersöker om det blir någon skillnad om EDTA tillsätts efter järndosen

Burk	EDTA	Fosfat efter (mg P/l)	% minskning
1	133 µl	0,62	17
2	1 ml	0,6	20
3	3 ml	0,7	7
4	Blank	0,62	17
5	3 ml, lågt pH	0,65	13

Slutsats: Skillnaden på procentuell rening blev marginell.

Försök utfört 050114

Fosfat ofiltrerat 0,53 mg P/l (obehandlat vatten)
Dos järnsulfat 140 µl

Utförande: EDTA tillsätts efter järnsulfaten
Försök med mycket mera EDTA testas

	EDTA	Fosfat efter (mg P/l)	% minskning
1	0	0,45	15
2	3 ml	0,44	17
3	6 ml	0,43	19
4	10 ml	0,42	21

Slutsats: Skillnaden på procentuell rening blev marginell. Därför tar vi bort EDTA som en parameter

EDTA som användes i försöken var $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$ Titrplex III

Humus

Försök utfört 041202

Fosfat ofiltrerat 1,7 mg P/l (obehandlat vatten)
Dos järnsulfat 440 µl

Humuslösning 3 g/l humussyra.

Två burkar kördes. En med humus och en utan humus

Burk	(mg P/l)	Rening %
1	0,84	0,51
2 (3 g humus/l)	0,84	0,51

Slutsats: Ingen skillnad över huvudtaget, kan bero på att humuspulvret inte torkades så blandningen blev för svag?

Försök utfört 041203

Fosfat ofiltrerat 1,75 mg P/l (obehandlat vatten)
Dos järnsulfat 440 µl

Pulvret vägdes upp efter torkning i ugn.

En burk kördes. Med humus

Burk	(mg P/l)	Rening %
1 (10 g humus/l)	0,9	0,49

Slutsats: Denna humuslösning verkar inte ha någon effekt på fällningen även vid väldigt hög dosering.

Humusen som användes i försöket var Humic acid, Sodium salt tech Cat.: H1,675-2

Lot.: S13693-04.

Kalcium

Försök utfört 050118

Fosfat ofiltrerat 1,15 mg P/l (obehandlat vatten)

Fosfat filtrerat 0,25 mg P/l (obehandlat vatten)

Dos järnsulfat 300 µl

Metod: 5 burkar kördes, två där Ca tillsattes före järnet och två där Ca tillsattes efter järnet och den sista utan Ca.

Plus	1ml	40 mg Ca/l
minus	125 µl	5 mg Ca/l

	Burk	Ofiltrerad behandlat	rening %	Filtrerad behandlat	rening %
	Utan Ca	0,58	0,50	0,02	11,5
Järn tillsätts före Ca	minus	0,56	0,51	0,03	7,3
	plus	0,48	0,58	0,03	7,3
Järn tillsätts Efter Ca	minus Fe	0,58	0,50	0,03	7,3
	plus	0,48	0,58	0,02	11,5

Slutsats: Reningen blir bättre med kalcium och det kommer att tillsättas efter järnet

Kalciumet som användes var Kalciumklorid CaCl_2 .

Sulfid

Försök utfört 050118

Fosfat ofiltrerat 1 mg P/l (obehandlat vatten)

Dos järnsulfat 260 µl

Metod: tre burkar kördes en med hög halt sulfid, en med låg halt sulfid och en med bara järn.

Nivåer	Halt mg/l	Dosering
1	2	160 µl
-1	0,5	39 µl

Ingen justering av pH
Sulfid tillsattes innan järnet

Burk	Nivå	Fosfat Ofi. mgP/L	% rening
1	1	0,9	10
2	-1	0,76	24
3	Bara Fe	0,72	28

Slutsats: Denna metod fungerar.

Sulfiden som användes var $\text{Na}_2\text{S} \cdot (7-9)\text{H}_2\text{O}$

Lösningen:

2 ml 6 M HCl

20 ml milli-Q Vatten

2,0048 g $\text{Na}_2\text{S} \cdot (7-9)\text{H}_2\text{O}$

Tag en behållare som går att tillsluta, tillsätt milli-Q vatten

För att få en syrefri lösning måste milli-Q vattnet bubblas med kvävgas under hela blandningen.

Tillsätt sulfiden

Tillsätt HCl

Järnsulfat lösningen

För att förhindra att Fe(II) oxideras till Fe(III) i lösningen sänks pH med HCl, pH blir runt 0,2 i lösningen. En halvliter lösning förbereds enligt följande:

0,45 l Milli-Q vatten

0,05 l HCl (37 %)

34,75625 g FeSO₄·7H₂O

Beräkning av mängd lösning

Molförhållandet mellan P: Fe är (1:2). Fosfathalten i det ofiltrerade inkommande vattnet används för att beräkna hur mycket järnsulfatlösning som behövs. Beräkningen redovisas nedan.

$$\frac{X \text{ mg P}}{l} * \frac{1 \text{ mol P}}{30,975 * 10^3 \text{ mg}} * \frac{2 \text{ mol Fe}}{1 \text{ mol P}} * \frac{1 l \text{ lösning}}{0,25 \text{ mol}} = Y l \text{ lösning}$$

X= fosfat (mg P/l)

Y= mängd järnsulfat som tillsätts provet

Mätning av totalfosfor

Den högsta halt som kan mätas utan spädning är 0,80 mg/l och den lägsta är 0,02 mg/l med den här metoden. Oxisolv används för att komplexa oorganiska fosfat och organiskt bunden fosfor ska överföras till ortofosfat.

Utförande av provet

1. Skaka proverna för att jämnfördela suspenderad substans.
2. 15 ml prov överförs till en uppslutningsflaska
3. Tillsätt 3 reagensskedar (ca 350mg) Oxisolv till uppslutningsflaskan
4. Sätt på locket och placera uppslutningsflaskorna i micron och koka i 30 min vid 200 kPa tryck (120°C), kyl till rumstemperatur

Vid varje mättillfälle skall en reagenskontroll (30ml)vatten och minst ett kalibreringskontrollprov (30ml fosfatlösning II) genomgå uppberedningen som beskrivs ovan.

5. Färgframkallning

Ställ in DR2010-fotometern enligt bruksanvisningen till PAV metodval (prog 490). Nollställ fotometern mot vatten.

6. 0-Lösning

Tillsätt innehållet från en Phosver 3 reagenskudde till en 10 ml mätcylinder och fyll till 10 ml märket med vatten och skaka väl i 2 min. Vänta 5 minuter för eventuell färgframkallning och avläsa fosforhalten P_0 (mg/l P) högst 10 minuter efter reagenstillsatts. Om P_0 -värdet överstiger 0,02 mg/l fosfor är reagenskuddarna eller vattnet av undermålig kvalitet – kontrollera – gör om analysen.

7. Reagenskontroll

Tillsätt innehållet från en Phosver 3 reagenskudde till en 10 ml mätcylinder och fyll till 10 ml märket med uppslutet reagenskontrollprov. Skaka väl i 2 min och vänta 5 minuter för eventuell färgframkallning och avläsa fosforhalten P_R (mg/l P) högst 10 minuter efter reagenstillsatts. Om $P_R - P_0$ värdet överstiger 0,03 mg/l fosfor är Oxisolvreagensen av undermålig kvalitet – kontrollera – gör om analysen.

8. Prov, hög fosforhalt (>0,8 mg/l P)

Om totalfosforhalten förväntas överstiga 0,8 mg/l överför med pipett volymen (V ml) från tabellen av uppslutet prov till en 10 ml mätcylinder.

Förväntad totalfosforhalt (mg/l P)	Volym uppslutet prov (V ml)
0,0-0,8	10
0,8-2,0	5
2,0-4,0	2
4,0-10,0	-
10,0-20,0	-

Tillsätt innehållet från en Phosver 3 reagenskudde och skölj med vatten ned reagenspulvret och späd till 10 ml märket. Skaka väl i 2 min och avläs fosforhalten (P_s mg/l P) mellan 5 och 10 minuter efter reagenstillsatts.

9. Prov, låg fosforhalt (<0,8 mg/l P)

Om totalfosforhalten förväntas understiga 0,8 mg/l tillsätt innehållet från en Phosver 3 reagenskudde till 10 ml mätcylinder. Skölj ned reagenspulvret och fyll till märket med uppslutet prov. Skaka väl i 2 min och avläs fosforhalten (P_s mg P /l) mellan 5 och 10 minuter efter reagenstillsatts.

Totalfosfor mg/l P = ($P_s + P_0 + P_R$)

Bestämning av Fe (II) och Fe (tot)

Då pH understiger 2 omvandlas järn till Fe^{2+} och Fe^{3+} . Vid detta låga pH undviks att tvåvärt järn oxideras till trevärt. pH sänks med hjälp av HCl. Fe (tot) bestäms som Fe (II) efter det att Fe (III) har reducerats till Fe (II) genom att hydroxylamin hydroklorid tillsätts. Fe (III) kan bestämmas som skillnaden mellan Fe (tot) och Fe (II).

Lösningar:

1. Fe (II) standardlösning

500 ml Milli-Q vatten. 33 ml 37 % HCl. 0,3912 g $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Späd med Milli-Q vatten till 1000 ml.

2. 0,4 M HCl

500 ml Milli-Q vatten. 33 ml 37 % HCl. Späd med Milli-Q vatten till 1000 ml.

3. 0,5 M HCl

500 ml Milli-Q vatten. 41 ml 37 % HCl. Späd med Milli-Q vatten till 1000 ml.

4. Ferrozine/Hepes lösning

En 1 liters bägare rengörs med HCl. 0,5 g Ferrozine $\text{C}_{20}\text{H}_{13}\text{N}_4\text{O}_6\text{S}_2\text{Na}$ tillsätts tillsammans med 5,95 g Hepes till 400 ml Milli-Q vatten. Lös med hjälp av magnetorrörare. Höj pH till 7. (Kalibrera pH - mätaren. Använd två punkter inom det intervall du skall röra dig. Finns lösningar med pH 4,7 och 11.) Tillsätt 3 M NaOH droppvis till pH 7 uppnås. Tillsätt slutligen Milli-Q vatten till 500 ml.

5. Hydroxylamin hydroklorid 10 %

10 g hydroxylamin (HONH_3Cl) löses Milli-Q vatten till 100 ml.

Standardkurva:

En standardkurva för Fe (II) samt för Fe (tot) bör förberedas innan varje försök se tabellen nedan. Två prover av vardera koncentration förbereds. För analys av Fe (tot) tillsätts 400 μl Hydroxylamin 10 % innan Ferrozine/Hepes lösningen tillsätts.

Koncentration (μM)	Fe (II) standard (μl)	0,4 M HCl (μl)	Ferozine/Hepes-lösning (ml)
0	0	100	3,9
10	40	60	3,9
20	80	20	3,9
25	100	0	3,9

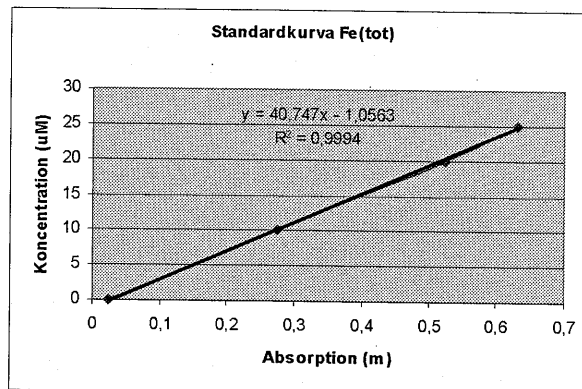
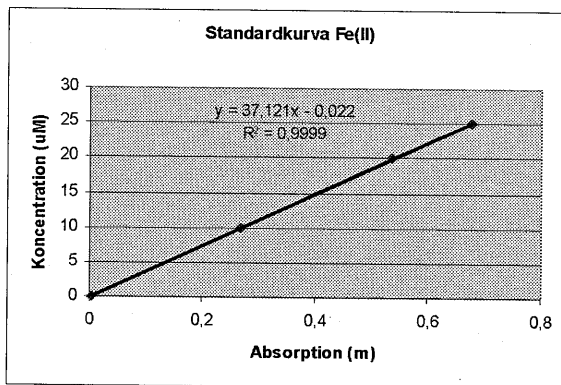
Analysera proverna i spectrophotometern. Denna bör värma upp en timme före användning. Skölj kuvetterna noggrant innan användning och kontrollera att de inte är repade. Sätt den blanka ytan mot ljuset.

Appendix 9 2(2)

Upprätta standardkurva genom att ta medelvärdet av de båda mätningarna. Kurvan konstrueras genom att absorptionen plottas på x-axeln och järnkonzentrationen i μM på y-axeln. En ekvation för en rät linje genom punkterna uppskattas med hjälp av minsta-kvadrat metoden.

När kurvan är konstruerad kan mätningar med okänd koncentration påbörjas. Med hjälp av standardkurvans ekvation och den uppmätta absorptionen kan koncentrationen beräknas i μM . Genom att multiplicera med molvikten hos järn fås koncentrationen i mg/l .

Koncentration (μM)	Fe (II)			Fe (Tot)		
	A	B	Medel	A	B	Medel
0	0,002	0,003	0,0025	0,024	0,021	0,0225
10	0,265	0,271	0,268	0,273	0,277	0,275
20	0,535	0,537	0,536	0,515	0,533	0,524
25	0,682	0,673	0,6775	0,652	0,612	0,632



Genomförande vid analys av avloppsvatten:

Fe (II): Överför 100 μl av vattnet till 3,9 ml Ferrozine/Hepes lösning i ett provrör. Blanda proverna i 15 s och mät i spectrophotometern.

Fe (tot): Överför 100 μl av vattnet och 400 μl hydroxylamin hydroklorid till 3,9 ml Ferrozine/Hepes lösning i ett provrör. Låt provet stå en liten stund och mät i spectrophotometern.

Försök 1

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
1	-	-	-	-

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	1	1	1
Burk nummer	8	7	4

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,25	7,23	7,03	
Justerat	6,5	6,5	6,5	
Efter	6,54	6,5	6,53	
Förändring	0,04	0	0,03	efter - justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före (mg/l)	1,5	0,6	0,5	
Efter (mg/l)	0,9	0,2	0	
Förändring	-0,6	-0,4	-0,5	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	26,16988	23,61219	30,55831
	Filtrerat	0	4,341854	0
Efter	Filtrerat	39,9	57,72	95,196
Dos. järnsulfat (ml)		0,49	0,61	0,78
Dosering Järn (ug)		6835,50	8439,75	10811,25
% järn som försvunnit		99,42	99,32	99,12

SS

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före (mg/l)		58	83,33333	105,3333	
Efter (mg/l)		64,6666	59,333	73,333	
Förändring		-6,67	24,00	32,00	Före-efter
Procentuell minskning		-11,49	28,80	30,38	

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,75	3,45	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,9	1,85	2,25	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,65	2,6	2,75	(mg P/l)
	Filtrerat	0,98	0,83	0,28	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		48,42105	55,13514	87,55556	minskning %
Förändring - ofiltrerat		3,636364	24,63768	35,29412	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,9	2,35	3	(mg P/l)
	Filtrerat	1,45	1,70	2,02	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,77	0,85	0,19666	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		47,01835	50	90,24826	minskning %

Försök 2

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
2	+	-	-	-

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	1	2	2
Burk nummer	1	2	5

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,36	7,36	7,27	
Justerat	8	8	8	
Efter	7,4	7,4	7,42	
Förändring	-0,6	-0,6	-0,58	efter-justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	2,4	2,2	0,7	
Efter	0,2	1,1	0	
Förändring	-2,2	-1,1	-0,7	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	26,16988	21,34509	29,40406
	Filtrerat	0	49,68382	0
Efter	Filtrerat	0	48,684	0
Dos. järnsulfat (ml)		0,49	0,63	0,76
Dosering Järn (ug)		6835,50	8830,35	10629,90
% jäm som försvunnit		100,00	99,45	100,00

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före (mg/l)	58	102,6667	107,3333	
Efter (mg/l)	65,33	32	41,3333	
Förändring	-7,33	70,67	66,00	Före-efter
Procentuell minskning	-12,64	68,83	61,49	

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,75	3,75	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,9	1,8	2,3	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,1	1,04	1,35	(mg P/l)
	Filtrerat	0,3	0,1	0,06	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		84,21053	94,44444	97,3913	minskning %
Förändring - ofiltrerat		23,63636	72,26667	68,23529	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,9	2,45	2,95	(mg P/l)
	Filtrerat	1,45	1,62	2,15	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,23	0,0433	0,02	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		84,17431	97,32165	99,06977	minskning %

Försök 3

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
3	-	+	-	-

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	2	1	2
Burk nummer	3	8	7

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,24	7,26	7,31	
Justerat	6,5	6,5	6,5	
Efter	6,56	6,56	6,51	
Förändring	0,06	0,06	0,01	efter-justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	1,8	0,5	0,6	
Efter	3,5	0,7	1,4	
Förändring	1,7	0,2	0,8	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	3,287136	23,61219	29,40406
	Filtrerat	22,47864	4,341854	0
Efter	Filtrerat	6,72	46,424	133,287
Dos. järnsulfat (ml)		0,48	0,61	0,76
Dosering Järn (ug)		6696,00	8439,75	10629,90
% järn som försvunnit		99,90	99,45	98,75

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	44	83,33333	107,3333	
Efter	46	55,333	53,33333	
Förändring	-2,00	28,00	54,00	Före-efter
Procentuell minskning		-4,55	33,60	50,31

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,6	3,45	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,75	1,85	2,3	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,45	2,2	2,25	(mg P/l)
	Filtrerat	0,3	0,4	0,78	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		82,85714	78,37838	66,08696	minskning %
Förändring - ofiltrerat		5,769231	36,23188	47,05882	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,85	2,35	2,95	(mg P/l)
	Filtrerat	1,48	1,70	2,15	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,24	0,20666	0,693333	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		83,78378	87,84353	67,75195	minskning %

Försök 4

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
4	+	+	-	-

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	1	1	2
Burk nummer	4	6	1

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,34	7,27	7,29	
Justerat	8	8	8	
Efter	7,52	7,35	7,38	
Förändring	-0,48	-0,65	-0,62	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	2,1	1,9	1,2	
Efter	2,2	1,2	1,8	
Förändring	0,1	-0,7	0,6	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	26,16988	23,61219	29,40406
	Filtrerat	0	4,341854	0
Efter	Filtrerat	0	28,352	0
Dos. järnsulfat (ml)		0,49	0,61	0,76
Dosering Järn (ug)		6835,50	8439,75	10629,90
% järn som försvunnit		100,00	99,66	100,00

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	58	83,33333	107,3333	
Efter	59,333	35,333	27,3333	
Förändring	-1,33	48,00	80,00	Före-efter
Procentuell minskning		-2,30	57,60	74,53

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,75	3,45	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,9	1,85	2,3	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	1,75	1,3	1,35	(mg P/l)
	Filtrerat	0,34	0,21	0,17	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		82,10526	88,64865	92,6087	minskning %
Förändring - ofiltrerat		36,36364	62,31884	68,23529	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,9	2,35	2,95	(mg P/l)
	Filtrerat	1,45	1,70	2,15	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,26	0,16333	0,12666	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		82,11009	90,39235	94,10884	minskning %

Försök 5

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
5	-	-	+	-

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	2	2	1
Burk nummer	2	6	1

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,24	7,33	7,02	
Justerat	6,5	6,5	6,5	
Efter	6,55	6,57	6,49	
Förändring	0,05	0,07	-0,01	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	2,2	2	0,6	
Efter	2,7	1	0,3	
Förändring	0,5	-1	-0,3	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	3,287136	21,34509	30,55831
	Filtrerat	22,47864	49,68382	0
Efter	Filtrerat	13,584	67,886	140,212
Dos. järnsulfat (ml)		0,48	0,63	0,78
Dosering Järn (ug)		6696,00	8830,35	10811,25
% järn som försvunnit		99,80	99,24	98,70

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	44	102,6667	105,3333	
Efter	55,33	50,6666	75,3333	
Förändring	-11,33	52,00	30,00	Före-efter
Procentuell minskning		-25,75	50,65	28,48

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,6	3,75	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,75	1,8	2,25	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,25	1,76	2,35	(mg P/l)
	Filtrerat	0,48	0,5	0,55	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		72,57143	72,22222	75,55556	minskning %
Förändring - ofiltrerat		13,46154	53,06667	44,70588	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,85	2,45	3	(mg P/l)
	Filtrerat	1,48	1,62	2,02	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,367	0,4433	0,46	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		75,2027	72,57938	77,19008	minskning %

Försök 6

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
6	+	-	+	-

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	2	1	2
Burk nummer	4	3	2

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,27	7,26	7,27	
Justerat	8	8	8	
Efter	7,36	7,34	7,4	
Förändring	-0,64	-0,66	-0,6	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	2	1,6	0,8	
Efter	2,2	0,7	0,3	
Förändring	0,2	-0,9	-0,5	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	3,287136	23,61219	29,40406
	Filtrerat	22,47864	4,341854	0
Efter	Filtrerat	0	35,129	13,245
Dos. järnsulfat (ml)		0,48	0,61	0,76
Dosering Järn (ug)		6696,00	8439,75	10629,90
% järn som försvunnit		100,00	99,58	99,88

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	44	83,33333	107,3333	
Efter	14,667	38,667	25,3333	
Förändring	29,33	44,67	82,00	Före-efter
Procentuell minskning		66,67	53,60	76,40

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,6	3,45	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,75	1,85	2,3	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	1	1,05	1,05	(mg P/l)
	Filtrerat	0,1	0,25	0,09	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		94,28571	86,48649	96,08696	minskning %
Förändring - ofiltrerat		61,53846	69,56522	75,29412	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,85	2,35	2,95	(mg P/l)
	Filtrerat	1,48	1,70	2,15	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,08	0,15333	0,04667	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		94,59459	90,98059	97,8293	minskning %

Försök 7

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
7	-	+	+	-

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	2	2	1
Burk nummer	1	7	2

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,24	7,29	7,04	
Justerat	6,5	6,5	6,5	
Efter	6,58	6,55	6,58	
Förändring	0,08	0,05	0,08	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	2,5	0,3	0,5	
Efter	3,9	1,9	1	
Förändring	1,4	1,6	0,5	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	3,287136	21,34509	30,55831
	Filtrerat	22,47864	49,68382	0
Efter	Filtrerat	11,296	66,756	122,898
Dos. järnsulfat (ml)		0,48	0,63	0,78
Dosering Järn (ug)		6696,00	8830,35	10811,25
% järn som försvunnit		99,83	99,25	98,86

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	44	102,6667	105,3333	
Efter	39,333	42,6666	55,3333	
Förändring	4,67	60,00	50,00	Före-efter
Procentuell minskning		10,61	58,44	47,46839

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,6	3,75	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,75	1,8	2,25	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,05	1,75	2,05	(mg P/l)
	Filtrerat	0,28	0,58	0,23	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		84	67,77778	89,77778	minskning %
Förändring - ofiltrerat		21,15385	53,33333	51,76471	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,85	2,45	3	(mg P/l)
	Filtrerat	1,48	1,62	2,02	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,217	0,4967	0,126666	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		85,33784	69,27629	93,71904	minskning %

Försök 8

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
8	+	+	+	-

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	1	2	2
Burk nummer	6	4	3

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,34	7,33	7,27	
Justerat	8	8	8	
Efter	7,36	7,33	7,33	
Förändring	-0,64	-0,67	-0,67	efter-justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	1,9	1,9	0,7	
Efter	2,7	0,9	1,1	
Förändring	0,8	-1	0,4	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	26,16988	21,34509	29,40406
	Filtrerat	0	49,68382	0
Efter	Filtrerat	0,999	46,424	0
Dos. järnsulfat (ml)		0,49	0,63	0,76
Dosering Järn (ug)		6835,50	8830,35	10629,90
% järn som försvunnit		99,99	99,48	100,00

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	58	102,6667	107,3333	
Efter	45,333	31,3333	30	
Förändring	12,67	71,33	77,33	Före-efter
Procentuell minskning		21,84	69,48	72,05

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,75	3,75	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,9	1,8	2,3	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	1	0,96	1,1	(mg P/l)
	Filtrerat	0,22	0,04	0,09	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		88,42105	97,77778	96,08696	minskning %
Förändring - ofiltrerat		63,63636	74,4	74,11765	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,9	2,45	2,95	(mg P/l)
	Filtrerat	1,45	1,62	2,15	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,12	0,0133	0,053333	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		91,74312	99,17732	97,5194	minskning %

Försök 9

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
9	-	-	-	+

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	2	2	1
Burk nummer	8	8	3

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,25	7,29	7,02	
Justerat	6,5	6,5	6,5	
Efter	6,61	6,58	6,59	
Förändring	0,11	0,08	0,09	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	1,8	0,2	0,3	
Efter	1,3	0,1	0,3	
Förändring	-0,5	-0,1	0	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	3,287136	21,34509	30,55831
	Filtrerat	22,47864	49,68382	0
Efter	Filtrerat	33,035	76,922	136,749
Dos. järnsulfat (ml)		0,48	0,63	0,78
Dosering Järn (ug)		6696,00	8830,35	10811,25
% järn som försvunnit		99,51	99,13	98,74

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	44	102,6667	105,3333	
Efter	34	44,6666	70	
Förändring	10,00	58,00	35,33	Före-efter
Procentuell minskning		22,72727	56,49	33,54

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,6	3,75	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,75	1,8	2,25	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,5	2,45	3,1	(mg P/l)
	Filtrerat	1,28	1,42	1,05	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		26,85714	21,11111	53,33333	minskning %
Förändring - ofiltrerat		3,846154	34,66667	27,05882	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,85	2,45	3	(mg P/l)
	Filtrerat	1,48	1,62	2,02	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	1,067	1,24	0,84666	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		27,90541	23,29897	58,01686	minskning %

Försök 10

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
10	+	-	-	+

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	2	2	1
Burk nummer	7	3	6

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,24	7,35	7,05	
Justerat	8	8	8	
Efter	7,55	7,54	7,51	
Förändring	-0,45	-0,46	-0,49	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	1,8	1,9	0,4	
Efter	1	0,2	0	
Förändring	-0,8	-1,7	-0,4	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	3,287136	21,34509	30,55831
	Filtrerat	22,47864	49,68382	0
Efter	Filtrerat	0	48,684	0
Dos. järnsulfat (ml)		0,48	0,63	0,78
Dosering Järn (ug)		6696,00	8830,35	10811,25
% järn som försvunnit		100,00	99,45	100,00

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	44	102,6667	105,3333	
Efter	50	60,6666	62,6666	
Förändring	-6,00	42,00	42,67	Före-efter
Procentuell minskning		-13,64	40,91	40,50639

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,6	3,75	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,75	1,8	2,25	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,35	2,12	2,4	(mg P/l)
	Filtrerat	0,32	0,11	0,13	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		81,71429	93,88889	94,22222	minskning %
Förändring - ofiltrerat		9,615385	43,46667	43,52941	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,85	2,45	3	(mg P/l)
	Filtrerat	1,48	1,62	2,02	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,257	0,08	0,096666	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		82,63514	95,05155	95,20664	minskning %

Försök 11

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
11	-	+	-	+

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	1	2	2
Burk nummer	2	5	4

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,34	7,33	7,27	
Justerat	6,5	6,5	6,5	
Efter	6,67	6,63	6,59	
Förändring	0,17	0,13	0,09	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	2,4	2	0,6	
Efter	2,2	0,8	1,1	
Förändring	-0,2	-1,2	0,5	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	26,16988	21,34509	29,40406
	Filtrerat	0	49,68382	0
Efter	Filtrerat	21,593	58,849	154,063
Dos. järnsulfat (ml)		0,49	0,63	0,76
Dosering Järn (ug)		6835,50	8830,35	10629,90
% järn som försvunnit		99,68	99,34	98,55

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	58	102,6667	107,3333	
Efter	71,333	68,6667	71,3333	
Förändring	-13,33	34,00	36,00	Före-efter
Procentuell minskning		-22,99	33,12	33,54

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,75	3,75	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,9	1,8	2,3	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,45	2,56	2,95	(mg P/l)
	Filtrerat	0,7	0,43	0,96	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		63,15789	76,11111	58,26087	minskning %
Förändring - ofiltrerat		10,90909	31,73333	30,58824	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,9	2,45	2,95	(mg P/l)
	Filtrerat	1,45	1,62	2,15	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,56	0,3467	0,8133	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		61,46789	78,55464	62,17209	minskning %

Försök 12

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
12	+	+	-	+

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	2	1	1
Burk nummer	5	5	8

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,3	7,28	7,07	
Justerat	8	8	8	
Efter	7,57	7,54	7,5	
Förändring	-0,43	-0,46	-0,5	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	1,9	1,9	0,2	
Efter	1,7	0,1	0	
Förändring	-0,2	-1,8	-0,2	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	3,287136	23,61219	30,55831
	Filtrerat	22,47864	4,341854	0
Efter	Filtrerat	0	28,352	0
Dos. järnsulfat (ml)		0,48	0,61	0,78
Dosering Järn (ug)		6696,00	8439,75	10811,25
% järn som försvunnit		100,00	99,66	100,00

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	44	83,33333	105,3333	
Efter	47,333	58	55,3333	
Förändring	-3,33	25,33	50,00	Före-efter
Procentuell minskning		-7,57	30,40	47,47

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,6	3,45	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,75	1,85	2,25	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,25	2,1	2,25	(mg P/l)
	Filtrerat	0,22	0,21	0,34	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		87,42857	88,64865	84,88889	minskning %
Förändring - ofiltrerat		13,46154	39,13043	47,05882	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,85	2,35	3	(mg P/l)
	Filtrerat	1,48	1,70	2,02	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,163	0,14	0,29	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		88,98649	91,76471	85,61983	minskning %

Försök 13

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
13	-	-	+	+

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	1	1	1
Burk nummer	3	4	7

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,34	7,25	7,09	
Justerat	6,5	6,5	6,5	
Efter	6,59	6,56	6,55	
Förändring	0,09	0,06	0,05	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	2,3	1,7	0,4	
Efter	1	0,3	0,5	
Förändring	-1,3	-1,4	0,1	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	26,16988	23,61219	30,55831
	Filtrerat	0	4,341854	0
Efter	Filtrerat	39,9	59,979	196,77
Dos. järnsulfat (ml)		0,49	0,605	0,775
Dosering Järn (ug)		6835,5	8439,75	10811,25
% järn som försvunnit		99,42	99,29	98,18

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	58	83,33333	105,3333	
Efter	75,333	74	57,3333	
Förändring	-17,33	9,33	48,00	Före-efter
Procentuell minskning		-29,88	11,20	45,57

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,75	3,45	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,9	1,85	2,25	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,4	2,7	2,7	(mg P/l)
	Filtrerat	1,1	1,42	1,6	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		42,10526	23,24324	28,88889	minskning %
Förändring - ofiltrerat		12,72727	21,73913	36,47059	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,9	2,35	3	(mg P/l)
	Filtrerat	1,45	1,70	2,02	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,83	1,16	1,38	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		42,88991	31,76471	31,57025	minskning %

Försök 14

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
14	+	-	+	+

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	1	1	2
Burk nummer	5	2	8

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,32	7,27	7,29	
Justerat	8	8	8	
Efter	7,63	7,5	7,51	
Förändring	-0,37	-0,5	-0,49	efter-före

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	2,1	1,9	0,4	
Efter	0,3	0,1	0	
Förändring	-1,8	-1,8	-0,4	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	26,16988	23,61219	29,40406
	Filtrerat	0	4,341854	0
Efter	Filtrerat	0	36,259	40,947
Dos. järnsulfat (ml)		0,49	0,605	0,762
Dosering Järn (ug)		6835,5	8439,75	10629,9
% järn som försvunnit		100,00	99,57	99,61

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	58	83,33333	107,3333	
Efter	74	64	52,66666	
Förändring	-16,00	19,33	54,67	Före-efter
Procentuell minskning		-27,59	23,20	50,93168

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,75	3,45	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,9	1,85	2,3	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,25	2,1	2,1	(mg P/l)
	Filtrerat	0,24	0,25	0,3	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		87,36842	86,48649	86,95652	minskning %
Förändring - ofiltrerat		18,18182	39,13043	50,58824	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,9	2,35	2,95	(mg P/l)
	Filtrerat	1,45	1,70	2,15	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,15	0,16666	0,256667	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		89,6789	90,19647	88,06202	minskning %

Försök 15

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
15	-	+	+	+

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Burk: Delexperiment (1-2)	1	1	1
Burk nummer	7	1	5

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
pH: Före	7,25	7,26	7,03	
Justerat	6,5	6,5	6,5	
Efter	6,63	6,6	6,65	
Förändring	0,13	0,1	0,15	efter-Justerat

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Syre Före	1,5	2	0,3	
Efter	1,7	1,9	0	
Förändring	0,2	-0,1	-0,3	efter-före

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Fe (Tot) Före	Ofiltrerat	26,17	23,61	30,56
	Filtrerat	0,00	4,34	0,00
Efter	Filtrerat	57,06	52,07	106,74
Dos. järnsulfat (ml)		0,49	0,605	0,775
Dosering Järn (ug)		6835,5	8439,75	10811,25
% järn som försvunnit		99,17	99,38	99,01

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
SS Före	58	83,33333	105,33333	
Efter	74	81,333	90,6666	
Förändring	-16,00	2,00	14,67	Före-efter
Procentuell minskning		-27,59	2,40	13,92411

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Total fosfor Före	Ofiltrerat	2,75	3,45	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,9	1,85	2,25	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	2,55	2,7	2,9	(mg P/l)
	Filtrerat	1,18	1,05	0,3	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		37,89474	43,24324	86,66667	minskning %
Förändring - ofiltrerat		7,272727	21,73913	31,76471	minskning %

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Fosfat Före	Ofiltrerat	1,9	2,35	3	(mg P/l)
	Filtrerat	1,45	1,70	2,02	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,9	0,86	0,22	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		38,07339	49,41176	89,09091	minskning %

Försök 16

Försök	pH	Syre	Kalcium	Sulfid
16	+	+	+	+

Burk:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Delexperiment (1-2)	2	2	2
Burk nummer	6	1	6

pH:

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	7,3	7,37	7,26	
Justerat	8	8	8	
Efter	7,56	7,5	7,52	
Förändring	-0,44	-0,5	-0,48	efter-Justerat

Syre

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	2	2,7	0,7	
Efter	1,8	1,6	0	
Förändring	-0,2	-1,1	-0,7	efter-före

Fe (Tot)

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3
Före	Ofiltrerat	3,287136	21,34509	29,40406
	Filtrerat	22,47864	49,68382	0
Efter	Filtrerat	0	45,295	0
Dos. järnsulfat (ml)		0,48	0,633	0,762
Dosering Järn (ug)		6696	8830,35	10629,9
% järn som försvunnit		100,00	99,49	100,00

SS

	Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	44	102,6667	107,3333	
Efter	50	47,33333	52	
Förändring	-6,00	55,33	55,33	Före-efter
Procentuell minskning		-13,64	53,90	51,55

Total fosfor

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	2,6	3,75	4,25	(mg P/l)
	Filtrerat	1,75	1,8	2,3	(mg P/l)
Efter	Ofiltrerat	1,9	1,64	1,85	(mg P/l)
	Filtrerat	0,12	0,05	0,09	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		93,14286	97,22222	96,08696	minskning %
Förändring - ofiltrerat		26,92308	56,26667	56,47059	minskning %

Fosfat

		Omgång 1	Omgång 2	Omgång 3	
Före	Ofiltrerat	1,85	2,45	2,95	(mg P/l)
	Filtrerat	1,48	1,62	2,15	(mg P/l)
Efter	Filtrerat	0,07	0,05333	0,06	(mg P/l)
Förändring - filtrerat		95,27027	96,70124	97,2093	minskning %

