

Reduktion av naturligt organiskt material och mikroorganismer i konstgjord grundvattenbildning

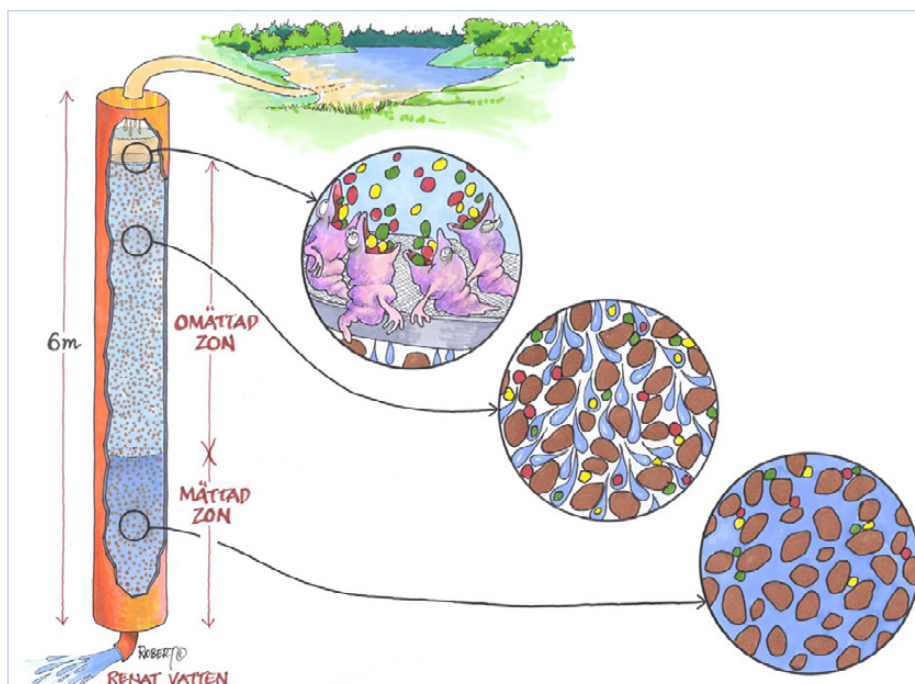
– Del 1: Kolonnförsök med natursand ifrån Gråbo

Måns Lundh

Emma Holmström

Jonas Långmark

Henrik Rydberg



VA-Forsk

VA-Forsk är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet. FoU-avgiften är för närvarande 1,05 kronor per kommuninnevånare och år. Avgiften är obligatorisk. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

VA-Forsk initierades gemensamt av Svenska Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvattenrening
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

VA-Forsk styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Anders Lago, ordförande	Södertälje
Olof Bergstedt	Göteborgs VA-verk
Roger Bergström	Svenskt Vatten AB
Daniel Hellström	Stockholm Vatten AB
Stefan Marklund	Luleå
Mikael Medelberg	Roslagsvatten AB
Anders Moritz	Linköping
Peter Stahre	VA-verket Malmö
Jan Söderström	Sv Kommunförbundet
Göran Tägtström	Borlänge
Agneta Åkerberg	Falkenberg
Steinar Nybruket, adjungerad	NORVAR, Norge
Thomas Hellström, sekreterare	Svenskt Vatten AB

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

VA-Forsk
Svenskt Vatten AB
Box 47607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Reduktion av naturligt organiskt material och mikroorganismer i konstgjord grundvattenbildning – Del 1: Kolonnförsök med natursand ifrån Gråbo
Title of the report:	Reduction of natural organic matter and microorganisms in artificial groundwater recharge. Part 1: Column experiment with natural sand from Gråbo
Rapportens beteckning Nr i VA-Forsk-serien:	2006-19
Författare:	Måns Lundh, Emma Holmström, Göteborgsregionens Kommunalförbund; Jonas Långmark, Smittskyddsinstitutet; Henrik Rydberg, Göteborgs va-verk
VA-Forsk-projektnr:	24-120
Projektets namn:	Avskiljning av naturligt organiskt material och patogener i konstgjord grundvattenbildning – försök i kolonn och pilotskala med natursand och järnoxid-täckt olivinsand
Projektets finansiering:	VA-Forsk, Göteborgs stad, Lerums kommun, Göteborgsregionens Kommunalförbund
Rapportens omfattning Sidantal: Format:	86 A4
Sökord:	Dricksvatten, mikrobiologisk barriär, bakterier, virus, organiskt material, kolonnförsök, konstgjord grundvattenbildning
Keywords:	Water treatment, microbiological barrier, natural organic matter, column experiment, artificial groundwater recharge
Sammandrag:	Resultat från kolonnförsök av den mikrobiologiska barriärverkan och avskiljningen av NOM i omättad zon vid konstgjord grundvattenbildning.
Abstract:	Results from an investigation of the microbiological barrier and the reduction of NOM in the unsaturated zone in artificial groundwater recharge.
Målgrupper:	VA-ansvariga, tillsynsmyndigheter, forskare, VA-konsulter
Omslagsbild:	Febril aktivitet i en kolonn. Illustratör: Robert Källgren. Lätt modifierad av Svenskt Vatten
Rapporten beställs från:	Finns att hämta hem som pdf-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2006
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Följande projekt har genomförts för att öka kunskapen om processerna som styr förändringen av vattenkvaliteten vid konstgjord grundvattenbildning med bassänginfiltration. Studien har ingått i en utredning om möjligheten att bygga en dylik anläggning i Gråbos glaciala deltaformation. Förhoppningen är att denna rapport ska förmedla ny kunskap som kan bidra till att nya och gamla anläggningar med konstgjord grundvattenbildning kan projekteras, byggas och optimeras till att producera ett mikrobiologiskt säkert, gott och tillförlitligt vatten. Studien har finansierats av Svenskt Vatten (VA-Forsk), Göteborgsregionens Kommunalförbund (EU-projekt ARTDEMO), Göteborg stad och Lerum kommun.

Rapporten är en första rapportering av VA-Forsk projektet 24-120: *Avskiljning av naturligt organiskt material och patogener i konstgjord grundvattenbildning – försök i kolonn och pilotskala med natursand och järnoxidtäckt olivinsand*, som genomförts tillsammans med Sveriges Lantbruksuniversitet, Artesia Grundvattenkonsult AB och Eskilstuna Kommun. Andra delen av projektet pågår i skrivande stund och rapporteras under 2006/2007. Organisationerna i andra delen har bidragit till denna rapport genom informationsbidrag från Dan Berggren, SLU, och Per-Olof Johansson, Artesia Grundvattenkonsult AB, till bakgrundstexten om naturligt organiskt material och järnoxidtäckt olivinsand, samt med genomläsning av och värdefulla kommentarer till rapporten.

Ett stort tack till personalen på Lackarebäcks vattenverk för all hjälp vid projektets genomförande. Tack till Olof Bergstedt, Olle Ljunggren och Bengt Dahlberg vid Göteborgs va-verk, Anders Janson vid Lerum Kommun, samt Torsten Hedberg vid Chalmers Tekniska Högskola, för värdefulla råd vid planeringen av försöket. Vidare tack till Olof Bergstedt och Bernt Persson vid Göteborgs va-verk, Bengt Zagerholm vid DHI Sverige och Kajsa Engblom vid GF Konsult AB, för genomläsning av och konstruktiva kommentarer till rapporten.

Göteborg, april 2006

Måns Lundh
Emma Holmström
Henrik Rydberg
Jonas Långmark

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	9
Summary	10
1 Introduktion	11
1.1 Allmänt	11
1.2 Bakgrund	11
1.3 Mikrobiologisk barriär	12
1.4 Naturligt organiskt material	13
1.5 Järnoxidbelagd olivinsand	13
1.6 Syfte med studien	13
2 Metod	14
2.1 Introduktion	14
2.2 Experimentuppställning	14
2.3 Geologisk och hydrogeologisk karaktärisering	14
2.4 Vattenkvalitet och naturligt organiskt material (NOM)	14
2.5 Reduktion av bakteriofager och bakterier	15
2.6 Fastläggning i sanden	15
3 Försöksuppställning	16
3.1 Introduktion	16
3.2 Råvatten	16
3.3 Period 1: jämförelse vid samma konfiguration	17
3.4 Period 2: olika djup av omättad och mättad zon	17
3.5 Provuttagens utformning	18
3.6 Materialpåfyllnad i kolonnerna	18
4 Geologisk karaktärisering	19
4.1 Introduktion	19
4.2 Metod	19
4.3 Storleksfördelning	19
4.4 Mineral och bergart	19
4.5 Slutsatser	20
5 Jämförbarhet – Period 1	20
5.1 Introduktion	20
5.2 Metod	20
5.3 Spårämnesförsök	21
5.4 Vattenkvalitet	21
5.5 Slutsatser	21
6 Hydrogeologisk karaktärisering	23
6.1 Introduktion	23
6.2 Metod	23

6.3	Uppehållstid	23
6.4	Vattenmättnad i omättad zon	24
6.5	Slutsatser	24
7	Vattenkvalitet vid infiltration av Delsjövatten	25
7.1	Introduktion	25
7.2	Metod	25
7.3	Råvatten	26
7.4	Period 2	26
7.5	Syre under period 2	28
7.6	Slutsatser	29
8	Reduktion av bakteriofager	29
8.1	Introduktion	29
8.2	Metod	30
8.3	Studerade mikroorganismer	30
8.4	Beräkning av reduktionen	31
8.5	Avvikelser i vattenkvalitet under tillsatsexperimenten	32
8.6	Resultat och diskussion	32
8.7	Avskiljningens lokalisering i kolonnen	36
8.8	Slutsatser	37
9	Reduktion av bakterier	37
9.1	Introduktion	37
9.2	Metod	37
9.2.1	Allmänt	37
9.2.2	Råvatten från Delsjöarna	38
9.2.3	Tillsatsexperiment 4	38
9.3	Råvatten från delsjöarna	38
9.4	Fluorescerande naturliga partiklar	38
9.5	Avloppstillsats	40
9.5.1	Tillsats	40
9.5.2	Utgående vattenkvalitet	41
9.6	Avskiljningens lokalisering i kolonnen	42
9.6.1	Allmänt	42
9.6.2	Metod	42
9.6.3	Resultat	44
9.7	Slutsatser	44
10	Reduktion av naturligt organiskt material	45
10.1	Introduktion	45
10.2	Metod	45
10.3	Råvatten	45
10.4	Period 1	46
10.5	Period 2	47
10.5.1	Reduktion i omättad zon	48
10.5.2	Reduktion i mättad zon	49
10.5.3	Reduktion i omättad zon med IOCO-sand	50
10.5.4	Jämförelse av omättad och mättad zon samt IOCO-sand	50
10.6	AOC	51
10.7	Trihalometanbildningspotentialen	51
10.8	Diskussion och slutsatser	52

11	Sammanfattande slutsatser	53
12	Kunskapsbehov.....	53
	Referenser.....	54
Bilaga A	Typiskt provtagningsschema period 2.....	57
Bilaga B:1	Bakteriofagkoncentrationer under tillsatsexperiment 1.....	58
Bilaga B:2	Bakteriofagkoncentrationer under tillsatsexperiment 2.....	60
Bilaga B:3	Bakteriofagkoncentrationer under tillsatsexperiment 3.....	62
Bilaga C:1	Tabell med statistik under perioder när inga tillsatsexperiment genomfördes: råvatten.....	69
Bilaga C:2	Tabell med statistik under perioder när inga tillsatsexperiment genomfördes: K0–K4.....	70
Bilaga C:3	Tabell med statistik under perioder när inga tillsatsexperiment genomfördes: K5 och K6.....	71
Bilaga D:1	Siktning av materialprov från alla kolonner.....	72
Bilaga D:2	Siktkurva för IOCO-sanden som användes i experimenten (North Cape Minerals AS, Norge)....	73
Bilaga E	Undersökning av bakterier och organiskt material i Gråbomaterialet under period 1	74
Bilaga F:1	Analysresultat för bakteriofager MS-2 och ΦX174 i kolonnsanden	76
Bilaga F:2	Analysresultat för bakteriofager ΦX174 i kolonnsanden – Diagram	78
Bilaga F:3	Analysresultat för bakteriofager MS-2 i kolonnsanden – Diagram	79
Bilaga G:1	Geokemisk data av Gråbomaterial och Dösebacka material	80
Bilaga H:1	Analysmetoder med rapportgräns för analyser under studien	83
Bilaga H:2	Analysmetoder med rapportgräns för analyser under studien	84
Bilaga I	Bakterier (och organiskt material) i Gråbosand efter experiment 4	85
Bilaga J	Grusundersökningar under försöken	86

Sammanfattning

Studien syftade till att undersöka den mikrobiologiska säkerheten och reduktionen av naturligt organiskt material i den omättade zonen vid konstgjord grundvattenbildning med bassänginfiltration. Detta omfattade att i kolonnförsök med omättad zon:

1. kvantifiera reduktionen av patogener genom att tillsätta indikatororganismer, konstgjorda partiklar och bakteriofager.
2. kvantifiera reduktionen av naturligt organiskt material.
3. undersöka i vilken mån järnoxidtäckt olivinsand förstärker reduktionen

Fem kolonner innehöll 5,4 m sand från Gråbos glaciala deltaavlagring där 1, 2 och 4 m omättad zon samt 2 m mättad zon undersöktes. Ytterligare två kolonner innehöll 2,5 m Gråbosand varav 0,3 m bestod av järnoxidtäckt olivinsand (IOCO). Det genomfördes fyra tillsatsförsök med avseende på indikatorbakterier och bakteriofager Φ X174 och MS-2. Prover av vatten togs regelbundet för de perioder då inga tillsatsförsök genomfördes.

Materialet från Gråbo hade ett ursprung från granit/gnejs med bl.a. 40 % kvarts och 27 % Na-fältspat med ett lerinnehåll på 2–3 %. Uppehållstiden var 13–44 h för 1–4 m omättad zon och 39 h för 2 m mättad zon. Den hydrauliska konduktiviteten i materialet låg mellan $0,4 \times 10^{-4}$ och $1,5 \times 10^{-4}$ m/s. Vattenundertrycket i omättad zon låg på ca –25 cm vattenpelare.

Den mikrobiologiska barriärverkan med avseende på virus var god i en omättad zon om 4 m ($3 \log_{10}$) och var högre än klordesinfektion ($2 \log_{10}$) och lika hög som kemisk fällning med filtrering ($3–4 \log_{10}$ för bakterier och virus). Barriärverkan var högre i omättad zon än i mättad zon. Järnoxidtäckt olivinsand förstärkte kraftigt virusreduktionen i omättad zon ($5–6 \log_{10}$ för Φ X174 och $4–5 \log_{10}$ för MS-2) och kan med fördel användas i syfte att förstärka barriärverkan i tunnare mäktigheter med omättad zon.

Den mikrobiologiska barriärverkan med avseende på bakterier var god i en omättad zon om 4 m ($\geq 2,4 \log_{10}$) och kunde likställas med klordesinfektion ($2 \log_{10}$) men var något sämre än kemisk fällning med filtrering ($3–4 \log_{10}$ för bakterier och virus). Det upptäcktes ingen tydlig skillnad i effektivitet mellan omättad och mättad zon. Resultatet visar att järnoxidtäckt olivinsand sannolikt förstärkte bakteriereduktionen i omättad zon och kan med fördel användas i syfte att förstärka den mikrobiologiska barriärverkan i tunnare mäktigheter med omättad zon.

Reduktionseffektiviteten med avseende på organiskt material var god i en omättad zon om 4 m med upp till 63 % reduktion av COD_{Mn} . Reduktionen var lägre under mättade förhållanden, framför allt med avseende på humusrelaterat material. Resultatet visar att ett lager på 30 cm IOCO-sand i gråbomaterialet kraftigt förstärkte reduktionen av organiskt material i 2 meter omättad zon för gråbomaterial. För UV-absorbans var den nästan 5 gånger så stor och för COD_{Mn} var den 2 gånger så stor.

Undersökningen indikerade en god reduktion i den omättade zonen av lättnedbrytbart organiskt material och organiskt material som deltar i trihalometanbildning.

Summary

The objective of the study was to investigate the microbiological barrier efficiency and the reduction of organic matter in the unsaturated zone in artificial recharge of groundwater by pond infiltration. The aims were to:

1. Quantify the reduction of pathogens by addition experiments with indicator bacteria, artificial particles and bacteriophages.
2. Quantify the reduction of natural organic matter.
3. Investigate if Iron Oxide Covered Olivine sand (IOCO) enhanced the reduction.

Five columns contained 5.4 m of sand from the Gråbo glacial delta formation, with study cases of 1, 2 and 4 m of unsaturated zone and 2 m of saturated zone. Two columns contained 2.5 m of Gråbo sand including 0.3 m of IOCO-sand. Samples for water quality were taken regularly during the times when addition experiments were not performed. Four addition experiments (spiking) were performed regarding indicator bacteria and bacteriophages Φ X174 and MS-2.

The material from Gråbo originated from granite/gneiss with 40 % Quartz and 27 % Na-silicates, with a clay content of 2–3%. The water transport time were 13–44 h for 1–4 m of unsaturated zone and 39 h for 2 m of saturated zone. The hydraulic conductivity was 0.4×10^{-4} to 1.5×10^{-4} m/s. The unsaturated water head was –25 cm.

The microbiological barrier efficiency regarding virus was good in 4 m of unsaturated zone ($3 \log_{10}$). It was higher than disinfection with chlorine ($2 \log_{10}$) and as high as chemical precipitation with filtration ($3\text{--}4 \log_{10}$ for bacteria and virus). The efficiency was higher in unsaturated zone compared to saturated zone. IOCO-sand strongly enhanced the reduction of virus (in total $4\text{--}6 \log_{10}$) and should be favourable in enhancing the reduction in a thinner layer of unsaturated zone.

The microbiological barrier efficiency regarding bacteria was good in 4 m of unsaturated zone ($\geq 2.4 \log_{10}$). It was similar to disinfection with chlorine ($2 \log_{10}$) and slightly lower than chemical precipitation with filtration ($3\text{--}4 \log_{10}$ for bacteria and virus). There was no obvious difference in efficiency between unsaturated and saturated condition. IOCO-sand probably enhanced the reduction of bacteria and should be favourable in enhancing the reduction in a thinner layer of unsaturated zone.

The reduction of organic matter was good in 4 m of unsaturated zone with up to 63 % reduction in COD_{Mn} . The reduction was slightly lower in the saturated zone, especially regarding organic matter measured with UV-absorbance. IOCO-sand strongly enhanced the reduction and should be favourable in enhancing the reduction in a thinner layer of unsaturated zone. The improvement was nearly 5-folded measured as UV-absorbance and 2-folded measured as COD_{Mn} .

The study indicated a reduction of easily degradable organic matter, critical for the re-growth potential in the distribution system, and organic matter that participate in the formation of trihalomethanes.

1 Introduktion

1.1 Allmänt

Denna rapport är en av två delrapporter som presenterar resultaten av en studie av den mikrobiologiska säkerheten och reduktionen av naturligt organiskt material i den omättade zonen vid konstgjord grundvattenbildning. I denna rapport behandlas kolonnförsök med glacial sand från Gråbodeltat i Lerums kommun, i Västra Götaland.

1.2 Bakgrund

Vattenburna sjukdomsutbrott sker fortfarande i Sverige liksom i resten av världen. Under åren 1980–2004 rapporterades 142 vattenburna utbrott med totalt 63 000 sjukdomsfall runtom i landet. I genomsnitt rapporteras nästan ett vattenburet utbrott med minst 1 000 drabbade per år. *Campylobakter* har varit det smittämne man funnit flest gånger, följt av norovirus och *Giardia Lamblia*, men i merparten av de vattenburna utbrotten har smittan inte lyckats identifieras (Smittskyddsinstitutet 2005). Således är den mikrobiologiska barriären mot sjukdomsframkallande mikroorganismer (patogener) som bakterier, virus och parasiter, vilka har sitt ursprung i fekalier¹, en viktig funktion vid beredning av dricksvatten. För att bygga nya vattenverk och reducera osäkerheten hos befintliga vattenverk, krävs kvantifierbar kunskap om den mikrobiologiska säkerhetsbarriären² vid dricksvattenberedning.

Alelyckans och Lackarebäcks vattenverk i Göteborg levererar dricksvatten till stora delar av Göteborgsregionen. Beredningstekniken bygger på kemisk fällning med efterföljande sedimentering och

kolfilter. Råvattenkällan är Göta älv som med medelvattenföringen 550 m³/s har mer än tillräckligt med vatten för att försörja området som idag använder normalt ca 2 m³/s, vilket är ca 63 miljoner m³ per år. Trots Göta älvs stora flöde och goda kvalitet på råvatten, har vattenverken problem med t.ex. temperatur, saltvatteninträngning från havet och fekal påverkan vid kraftiga, långvariga regn då markområden avvattnas och avloppsanläggningar bräddar sitt endast delvis behandlade vatten. Normaldrift och reservsystem bygger till stora delar på samma lösning, vilket är en tunnel mellan Alelyckan och Lackarebäck som byggdes under 1960-talet. Idag vet dock ingen hur säker tunneln är. Ett ras skulle kunna innebära ett avbrott på ca 1 år med dricksvattenbrist som följd.

Det pågår en utredning om möjligheten att producera grundvatten på konstgjord väg genom infiltration av ytvatten från Mjörn i Gråbodeltat, Lerums kommun, som ett komplement till det system som finns idag. Förutom att en oberoende vattentäkt används, förbättrar konstgjord infiltration vattenkvaliteten avsevärt på flera punkter. Bland annat bereds ett vatten med jämnare temperatur och den mikrobiologiska barriären är tänkt att förstärkas genom den naturliga desinfektion som marken bidrar med. Den omättade zonen tillmäts stor betydelse för det slutliga resultatet (Huisman 1983; Sundlöf & Kronqvist 1992; Frycklund 1998; Blomberg (red) 1999; EC projekt ENV4-CT95-0071 2001; Schijven 2001; Juhna 2002). Sålunda ligger det ett intresse i att bevara och kontrollera den omättade zonen vid bruket av en anläggning för konstgjord grundvattenbildning.

Isälvsdeltat i Gråbo har använts som grustäkt och en ansenlig del av den omättade zonen har forslats bort. På sina håll i Gråbodeltat är den omättade zonens mäktighet³ mindre än 1 m på grund av grusexploateringen och täktinnehavaren söker om att få bryta under grundvattenytan. Bedömningar visar att det går att få en omättad mäktighet på ca 2 m i ett framtida anläggande av ett infiltrationsverk, om resterande mängder sand och grus i täkten bevaras och jämnas ut över Gråbotäkten. Frågan är om den erhållna omättade zonen tjänar sitt syfte som mikrobiologisk barriär och hur effektiv den är.

1 Avföring, exkrementer.

2 Med en mikrobiologisk säkerhetsbarriär menas en anordning eller åtgärd i vattenverket som motverkar förekomst av sjukdomsframkallande virus, bakterier och parasitära protozoer i dricksvattnet (Livsmedelsverket 2004).

3 Mäktighet är ett begrepp inom geologin som anger tjockleken på ett geologiskt lager, t.ex. ett jordartslager.

I en VA-Forsk rapport redovisade Sundlöf och Kronqvist (1992) att utav de 21 besökta anläggningar i Sverige under 1992 hade 13 st en uppehållstid kortare än 60 dagar (rekommenderad uppehållstid i Nederländerna där betydelsefulla studier av virus i akviferer har genomförts) varav 12 anläggningar låg under 30 dagar. Virusgenombrott skulle kunna ske i anläggningarna och kompletterande åtgärder för att stärka den mikrobiologiska säkerheten med avseende på framförallt virus och parasiter kan vara aktuellt. En kompletterande åtgärd kan vara att utveckla anläggningarnas omättade zon.

1.3 Mikrobiologisk barriär

Med en mikrobiologisk säkerhetsbarriär menas en anordning eller åtgärd i vattenverket som motverkar förekomst av sjukdomsframkallande virus, bakterier och parasitära protozoer i dricksvattnet (Livsmedelsverket 2004). Idag finns inga specifika och kvantitativa krav i de svenska föreskrifterna för dricksvattenproduktion på hur effektiv de mikrobiologiska säkerhetsbarriärerna ska vara. Istället står det att läsa i vägledningen att en låg turbiditet ($<0,1$ FNU) och en 99 % ($2 \log_{10}$) reduktion av bakterier räknas som miniminivå för en barriär (Livsmedelsverket 2004). I en undersökning av kemisk fällning och snabbfiltrering låg avskiljningen av virus och fekala indikatorbakterier mellan 3 och $4 \log_{10}$, men vid $1-2 \log_{10}$ för naturliga partiklar i bakterie- och protozostorlek. Ultrafiltrering, med membran på 100 nm, visade sig i försök ge en avskiljning på 98–99,9 % av naturliga partiklar i bakteriestorlek och en log-avskiljning på 4,7–5,5 för tillsatta bakteriofager (Persson *et al.* 2005). Klorering ska ge avdödning på 99 % av bakterierna, men det råder tveksamhet om effektiviteten på mer tåliga virus och parasiter. I en sammanställning om långsamfiltrering (Logsdan *et al.* 2002) redovisas reduktioner på mellan $1 \log_{10}$ och $4 \log_{10}$ av parasiter, och oftast högre värden för virus.

Den mikrobiologiska barriärverkan grundar sig på två principer; avskiljning och inaktivering^{4/}

4 Virus är inget egentligt liv utan ligger på gränslinjen till vad som anses vara levande. Utanför en värd är virus inaktivt – det har t.ex. ingen egen metabolism. Begreppet inaktivering innebär att viruspartikeln bryts ner så att den inte kan infektera en biologisk cell. Retention (avskiljning)

avdödning. Vid filtrering sker den mesta avskiljningen de första 2 metrarna (Huisman 1983) och i konstgjord grundvattenbildning får man vanligen en tidig och effektiv avskiljning av bakterier och parasiter. På grund av parasiters goda överlevnad är risken för ett eventuellt genombrott dock betydelsefull (Schijven 2001). Mycket tyder på att virus kan transporteras långt i ett grundvatten. Beroende på hur genomsläppligt markmaterialet är, d.v.s. om det är finare sand eller grovt grus, kan mikroorganismer färdas alltifrån tiotals metrar till kilometer (Pang *et al.* 2005). Parasiter och virus är av särskilt intresse eftersom dessa organismer kan ha en lång överlevnad i marken.

Miljön i marken skiljer sig signifikant från den miljö i kroppen som fekala organismer normalt existerar i. Det betyder att vid en tillräcklig uppehållstid dör bakterier av och virus inaktiveras. Överlevnadstiden kan dock vara lång och bero på olika faktorer som t.ex. temperatur och vattenmättnad. I en rapport från Naturvårdsverket (Stenström *et al.* 1981) om avloppsinfiltration redovisas t.ex. tider i månader för överlevnad för bakterier.

Storleken på mikroorganismer och virus, samt deras adsorptionsegenskaper är betydande parametrar i avskiljningen. Jörgensen *et al.* (2001) fann att efter 10 dygn av transport i vatten under mark var reduktionen av bakteriofager (virus som angriper bakterier) $6 \log^5$ och efter 25 dygn $8 \log_{10}$. Schijven (2001) mätte reduktionen av virus genom att studera bakteriofager⁶ under mättade förhållanden och resultat visade på $8 \log_{10}$ reduktion av MS-2 fag för en uppehållstid på 38 dagar. En parameter som tycks vara av stor betydelse är vattenmättnaden i jorden som påverkar både överlevnad och transport (Jörgensen *et al.* 2001). Studier i omättad zon visar på en effektivare reduktion av virus (t.ex. Powelson & Gerba 1994; Poletika *et al.* 1995, refererad i Schijven 2001) än i mättad zon, sannolikt på grund av interaktionen mellan gas och vätska. I en svensk studie erhöll man 80 % reduktion av fager i ca fyra meter av omättade zonen (Blomberg 1999).

syftar till att viruspartikeln hålls fast och hindras fortsätta sin transport med vattnet eller luften. T.ex. kan det handla om att partikeln fastnar genom sorption på ett korn. Dock inaktiveras den inte förrän den äts upp av bakterier som energi och kolkälla, eller bryts ner kemiskt. Retention och inaktivering samlas under begreppet reduktion.

5 $\log(\text{uppmätt koncentration/ursprungskoncentration})=6$.

6 Virus som angriper bakterier.

Under 70-talet uppmärksammades virus som en potentiell risk då man insåg att koliformer och virus skiljer sig biologiskt åt på ett sådant sätt att det inverkar negativt på strategin att använda koliformer som indikatororganismer. Detta blir speciellt viktigt i grundvattensammanhang där den smittande partikeln transporteras genom marken och där storlek, ytkaraktär och laddning är avgörande för avskiljningen. Vissa studier (Leclerc *et al.* 2000 och ref. däri) pekar på att virala patogener har en annan resistens i vissa miljöer jämfört med bakteriella patogener. Det kan finnas mer än 140 typer av virus i våra tarmar. Några av dem finns i sådana koncentrationer i avloppsvatten att de kan framkalla sjukdom hos människor. En vanlig anledning till sjukdomsutbrott är Hepatitis A och E (HAV/HEV), calicivirus (inkluderat Norwalk virus), rotavirus och astrovirus (WHO 2004).

En mer ingående litteraturstudie redovisas i VA-Forskrapporten "Mikrobiologisk barriärverkan vid konstgjord grundvattenbildning – en litteraturstudie om påverkande faktorer" (Engblom & Lundh 2006).

1.4 Naturligt organiskt material

Många vattenverk har börjat få problem med råvattenkvaliteten med avseende på organiskt material och färg. Under 90-talet har en statistiskt säkerställd ökning av halten naturligt organiskt material (NOM) skett (Löfgren 2002) i typiska skogssjöar i södra Sverige och vid Stockholm Vattens båda anläggningar i Norsborg och på Lovön. De ökade NOM-halterna kan vara relaterade till klimatet, men idag vet man inte säkert.

NOM avskiljs i marken genom en kombination av fysikaliska, kemiska och biologiska processer. Sundlöf och Kronqvist (1992) redovisade en avskiljning på ca 30 % för svenska anläggningar med konstgjord grundvattenbildning med bassänginfiltration. Dock är det svårt att jämföra anläggningarna eftersom förhållanden, som uppehållstid och inblandning av grundvatten, är mycket skiftande. Mer detaljerade undersökningar i ett antal anläggningar visar dock på att 20–30 % minskning av COD_{Mn} erhålls i den omättade zonen vid sommartemperaturer men ett sämre resultat, ca 10 %, erhålls vid vintertemperaturer (Blomberg 1999). Vid undersökningar i kolonnförsök

uppmättes en reduktion av TOC med 3–25 % (Blomberg 1999), även då med en försämrad avskiljning vid lägre temperaturer. Inom ramen för samma projekt utfördes också undersökningar i Ekerö kommuns anläggning i Skytteholm som visade på en avskiljning i den omättade zonen av samma storleksordning och med samma temperaturberoende. Anläggningar som bygger på bassänginfiltration har således en begränsad förmåga att avskilja högre halter av NOM i råvattnet och en ökad halt i utgående vatten har observerats vid flera vattenverk (Katrineholm, Eskilstuna och Uppsala).

1.5 Järnoxidbelagd olivinsand

Järnoxidtäckt olivinsand är ett filtermaterial med en bättre förmåga att avskilja NOM än konventionell filtersand (Chang & Benjamin 1997; McMeen & Benjamin 1997). Materialet består av olivinsand ((Mg, Fe)₂SiO₄) som är belagd med ett tunt skikt av järnoxid (IOCO: Iron Oxide Coated Olivine). Det uppstår en mereffekt av olivinsanden som ger järnoxidskiktet goda laddningsegenskaper som får NOM att adsorberas effektivt även vid höga pH-värden (7–8). Studier (Berggren *et al.* 2004; Jonsson 2003) har visat att det finns en stor potential att öka avskiljningen av NOM i den omättade zonen med ett tunt skikt (ca 30 cm) av IOCO. Det är också möjligt att överlagra detta skikt med vanlig filtersand utan att den förstärkande effekten avtar. Studien visade också att förozoner av råvattnet ökade dessutom graden av avskiljning med en faktor två.

1.6 Syfte med studien

Studien syftade till att undersöka den mikrobiologiska säkerheten och avskiljningen av naturligt organiskt material i den omättade zonen i konstgjord grundvattenbildning. Målsättningen var att:

1. Kvantifiera avskiljningen/avdödningen av patogener⁷ i den omättade zonen genom att tillsätta

⁷ Sjukdomsframkallande bakterier, virus, svampar och protozoer.

indikatormikroorganismer, konstgjorda partiklar och bakteriofager i ett kolonnförsök.

2. Kvantifiera avskiljningen av naturligt organiskt material i den omättade zonen i såväl ett kolonnförsök som i en infiltrationsbassäng.
3. Kvantifiera effekten av förozonering av råvattnet på avskiljningen av naturligt organiskt material i den omättade zonen i kolonnförsök.
4. Undersöka vilken potential filtermaterial av järnoxidtäckt olivinsand har när det gäller att förbättra avskiljningen av såväl naturligt organiskt material som indikatormikroorganismer, konstgjorda partiklar och bakteriofager.

Försöken har utförts i kolonner uppförda på Lackarebäcks vattenverk i Göteborg och på Eskilstunas Hyndevadsanläggning med bassänginfiltration. Denna rapport behandlar försöken på Lackarebäcksverket och berör främst punkt 1, 2 och 4. Under 2006/2007 publiceras en rapport om resterande del av studien som utförts i Eskilstuna.

2 Metod

2.1 Introduktion

För att undersöka skillnader mellan kolonnerna påbörjades undersökningen med en första period (Period 1) där alla kolonner var lika konfigurerade. Därefter genomfördes studien av omättad zon (Period 2) i vilken även studien av avskiljning av NOM och mikroorganismer i järnoxidtäckt olivinsand ingick. I detta kapitel redovisas metoden övergripande medan detaljerna redovisas under respektive kapitel.

2.2 Experimentuppställning

Sju kolonner med en diameter av 0,3 m, byggdes upp på Lackarebäcks vattenverk. Kolonnerna fylldes med grusmaterial från Gråbodeltat i Lerum som

infiltrerades med råvatten från Delsjöarna⁸, vilket är samma råvatten som Lackarebäcksverket behandlar för dricksvattnet i Göteborg. Råvatten infiltrerades med en infiltrationshastighet på 0,5 m/d, vilket motsvarar ett flöde på 25 ml/min per kolonn. Flödet var omättat till olika djup i kolonnerna för att sedan övergå i mättad zon. En kolonn drevs med enbart mättad zon för jämförelse med de omättade zonerna och två kolonner innehöll ett 30 cm tjockt lager av järnoxidtäckt olivinsand under ett ytlager med 20 cm gråbosand. En begränsning under försöket var det snäva temperaturspann som kolonnerna utsattes för i och med att de stod uppställda inomhus.

2.3 Geologisk och hydrogeologisk karaktärisering

Materialet karaktäriserades med avseende på storleksfördelning och mineralinnehåll. Siktningen genomfördes dels på Lackarebäcks vattenverk, dels på KIWA i Nederländerna inom ramen för EU-projektet ARTDEMO, där även en mineral- och bergartsanalys genomfördes. Hydrogeologisk karaktärisering utfördes med spårämnesförsök. Därigenom erhöles hydraulisk uppehållstid. För att kontrollera att den omättade zonen inte mättades tillämpades två metoder; dels okulär besiktning av de hål i kolonnen som tjänstgjorde som platser för mätning med tensiometer, i vilka vatten skulle tränga ut vid mättade förhållanden, dels mätning av tryck med tensiometrar instuckna i hålen (där uppmätt undertryck visar på omättade förhållanden).

2.4 Vattenkvalitet och naturligt organiskt material (NOM)

Eftersom det sker ett kemiskt utbyte mellan vatten och jordmaterial då vattnet passerar jordmaterialet, analyserades vattenkvaliteten för de perioder då tillsatsexperiment inte pågick, som en del av arbetet

⁸ Råvatten till Lackarebäcks vattenverk tas från Delsjöarna (eg. främst Stora Delsjön) men består till stor del av vatten som pumpats från Göta älv för att tillgodose verkets behov.

med att karaktärisera experimentförhållandena. Under undersökningen togs prover av ingående och utgående vatten (även kallat filtrat) från kolonnerna regelbundet; varje vecka, varannan vecka, månadsvis och enstaka gånger beroende på analys och syfte (se bilaga A för exempel på provtagningsschema). Resultaten analyserades översiktligt med avseende på hydro- och geokemi samt på trender i jämförelsen mellan kolonnerna. Eftersom ett delmål med studien var att studera reduktionen av naturligt organiskt material, genomfördes en mer utförlig analys av provresultaten av COD_{Mn}, TOC och UV-absorbans 254 nm, vilken redovisas separat under ett eget kapitel sist i rapporten.

2.5 Reduktion av bakteriofager och bakterier

För att utmana gråbomaterialet med avseende på mikrobiologisk barriärverkan, utsattes kolonnerna för tillsatsexperiment med modellorganismer för bakterier och virus. För att simulera reduktionen av virus användes bakteriofager⁹, MS-2 och ΦX174. För att simulera bakterieredueringen användes de traditionella indikatororganismer Koliformer, *E.coli*, Enterokocker och *Cl.perfringens*. Även konstgjorda fluorescerande partiklar (s.k. beads) med hydrofila egenskaper tillsattes i kolonnerna för att undersöka reduktion med avseende på fastläggning

av bakterier. Följande tillsatsundersökningar genomfördes (Tabell 2-1).

Experiment 1 och 2 genomfördes som pulsförsök. En kort puls med faglösning tillsattes i inloppet och responsen studerades i utgående vatten från kolonnerna. I experiment 3 och 4 studerades responsen efter en kontinuerlig tillsättning av lösningen under längre tid. Avsikten var att uppnå ett konstant och stadigt reduktionsförhållande kolonnerna emellan (s.k. steady state).

Mycket tydde på att en tillsats strax efter en annan kunde få redan fastlagda viruspartiklar att vandra i kolonnen. Experiment 3:fas 1 var ett test av hur organiskt material och jonstyrka påverkade resultatet. Genom att tillsätta lösningen som fagerna odlades upp i, men utan fager, undersöktes det om fastlagda fager från experiment 1 och 2 släppte på grund av lösningens innehåll. Fas 2 var en mellanperiod utan tillsats för att normalisera förhållanden innan tillsättningen av faglösning startade (Fas 3).

2.6 Fastläggning i sanden

Ett flertal analyser utfördes på sandmaterialet med avseende på mikroorganismer och organiskt material för att undersöka var i kolonnerna¹⁰ reduktionen verkade främst (Bilaga I). Sandprover togs i provuttagshålen som fanns ovan grundvattenytan.

Tabell 2-1. Datum och tid för tillsatsexperiment.

Tillsats-experiment	Experiment 1 Fager	Experiment 2 Fager	Experiment 3:fas 1 Fager mix (1) utan fager	Experiment 3:fas 3 Fager mix (2) med fager	Experiment 4 Avloppstillsats + Beads
Typ av experiment	Kort puls	Kort puls	Lång puls	Lång puls	Lång puls
Start	2004-11-01 22:10	2005-02-21 22:00	2005-04-28 14:00	2005-05-23 15:35	2005-09-15 13:00
Slut	2004-11-01 22:50	2005-02-21 22:40	2005-05-11 14:40	2005-05-30 16:20	2005-09-26 13:00
Undersökta kolonner	Gråbo-kolonner	Gråbo-kolonner	Gråbo- och Olivinkolonner	Gråbo- och Olivinkolonner	Gråbo- och Olivinkolonner

¹⁰ Den mättade kolonnen blev enbart undersökt efter försök 4 eftersom det inte gick att öppna provuttagen utan att avbryta processen och tömma kolonnen på vatten först. Det ansågs vara viktigare att inte avbryta infiltrationen och därför blev inte den mättade kolonnen undersökt med avseende på fager.

⁹ Virus som använder bakterier som värd.

3 Försöksuppställning

3.1 Introduktion

Undersökningen genomfördes i sju kolonner som byggdes av PVC-rör med en diameter på 0,3 m. Gråbokolonnerna (K0-K4) var 6 m höga med 5,4 m sand från Gråbo grustäkt i Lerum.

Dessa sattes i drift under februari 2004. Olivinkolonnerna (K5 och K6) var 3 meter höga med 2,5 m material, vilket skulle motsvara de översta 3 m av kolonnerna K2 och K3 under period 2. I botten placerades ett 0,3 m lager med långsamfiltersand för att förhindra igensättning av utloppsdysorna. Därefter fylldes kolonnen på med 1,7 m naturlig sand från Gråbo grustäkt i Lerum som överlagrades med 0,3 m järnoxidtäckt olivinsand samt ytterligare 0,2 m med sand från Gråbo. Uppstart av olivinkolonnerna skedde 2005-02-14 och prover togs under grundvattenytan (GVY-0,1 m) mellan 2005-04-05 och 2005-09-30.

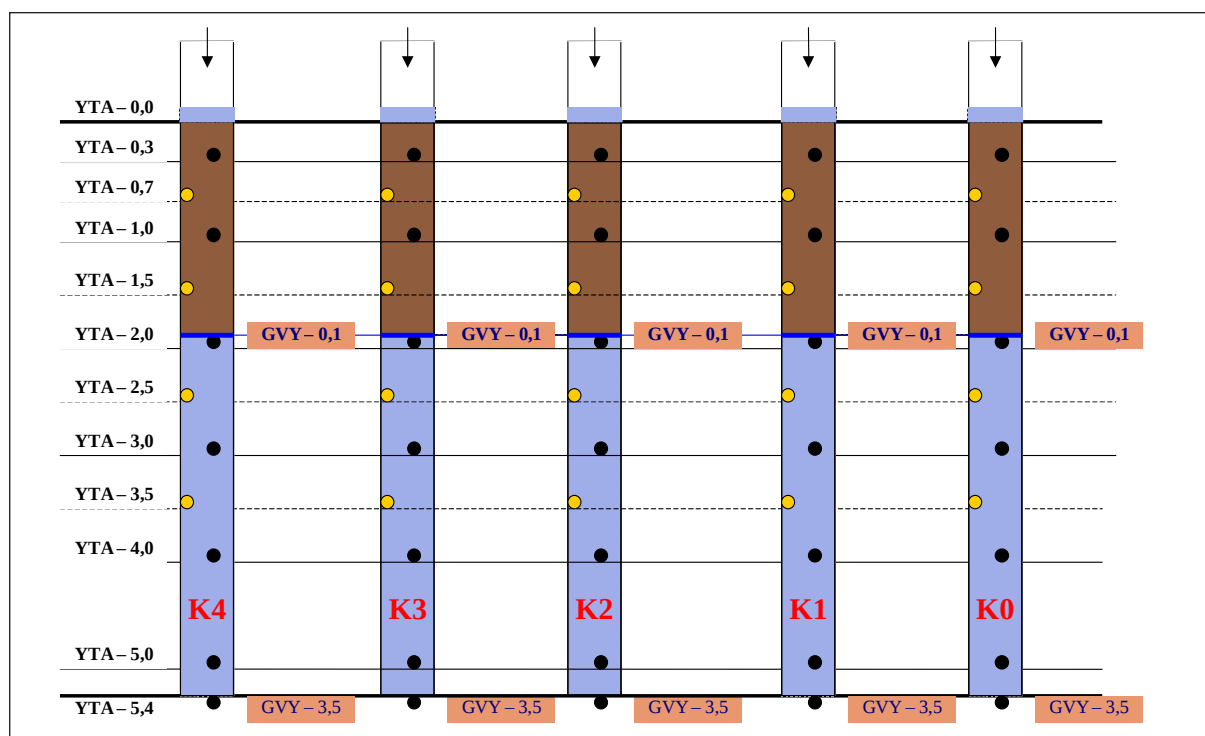
Grundvattenytans nivå i förhållande till sandytan i olivinkolonnerna var densamma som för K2 och K3. Således fanns det ett dubbelprov för Gråbosand

och ett dubbelprov för arrangemanget med olivin-sand. Grundvattenytan för alla kolonner reglerades med utloppsanordningen, vilket innebar att utloppsslangen monterades på den nivå där grundvattenytan skulle ligga för den specifika kolonnen.

Gråbokolonnerna belystes med konstgjort solljus. Olivinkolonnerna (K5 och K6) hade ingen belysning då det bedömdes att belysningen i Gråbokolonnerna hade haft en mindre inverkan på experimentet. Gråbokolonnerna deltog i alla försök medan olivinkolonnerna deltog enbart i tillsatsexperimenten med virus (Experiment 3) och med avlopp (Experiment 4). Kolonnernas utformning illustreras i figur 3-1, 3-2 och 3-3.

3.2 Råvatten

Råvatten togs från inkommande ledning till Lackarebäckverket. Ett biflöde leddes bort till kolonnuppställningen via slang till en flödeslåda som kontinuerligt bräddades med råvatten. Två slangpumpar med gemensam pumpning för respektive K0-K4 och K5-K6, var placerade vid flödeslådan. Vattnet transporterades upp i mjuka transparenta PVC-slangar



Figur 3-1. Schematisk bild av kolonner K0-K4 under period 1. De provuttag som användes är markerade i bilden. Blå färg är mättad sand och brun är omättad sand. Gula prickar markerar uttag för tensiometer och grusprov. Svarta prickar markerar uttag för vattenprov och grusprov.

till överdelen av kolonnrören. Vattnet droppade från slangändan ner i röret från ca en halvmeter ovanför grusytan. Prov togs i råvattnet efter slangarna och i distributionssystemet till anläggningen.

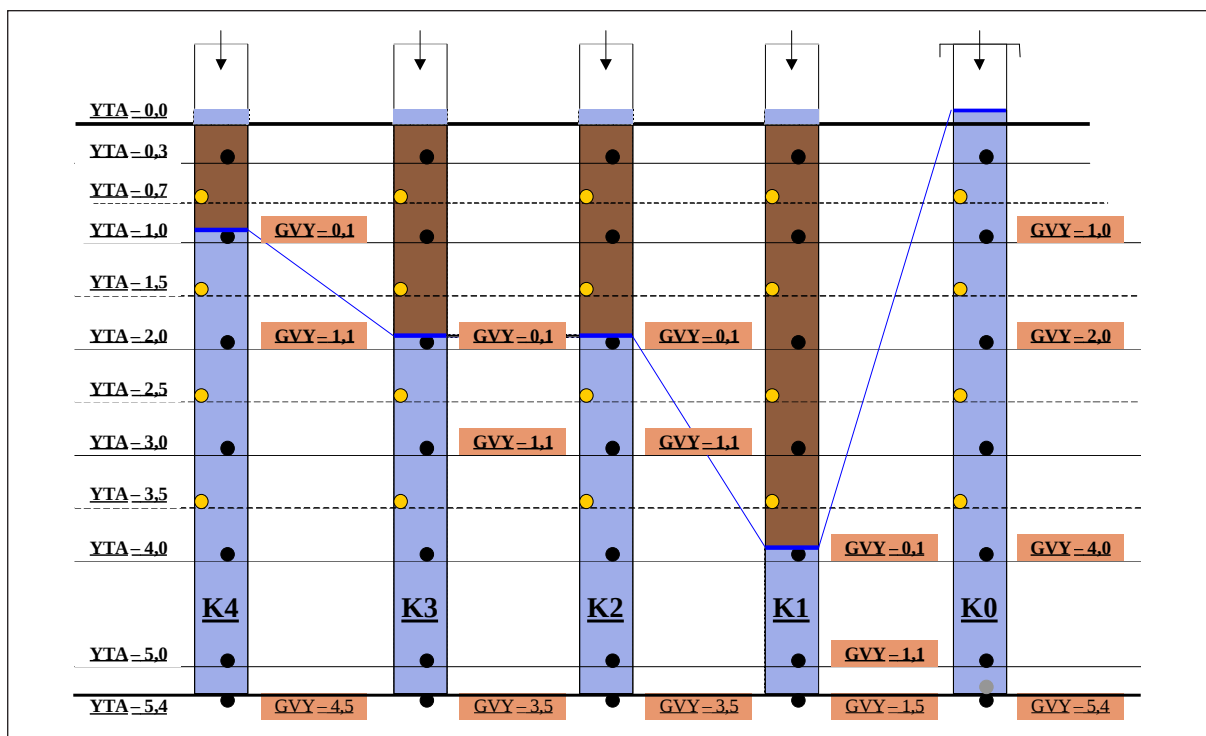
3.3 Period 1: jämförelse vid samma konfiguration

Existerande kolonner (K0-K4) var konfigurerade till att bestå av 2 m omättad zon följt av 3,5 meter mättad zon (Figur 3-1, ovan). Flödet var 25 ml/min motsvarande en ytbelastning på 0,5 m/d. För denna konfiguration togs prover mellan 2004-03-03 och 2004-05-14 i uttag strax under grundvattenytan (GVY-0,1 m) och i botten (GVY-3,5). Flödet gick omväxlande två olika vägar; antingen från ytan till botten eller från ytan till provuttag strax under grundvattenytan. Under perioden genomfördes spårämnesförsök med svag saltlösning för att undersöka uppehållstider i alla kolonner.

3.4 Period 2: olika djup av omättad och mättad zon

Den inledande perioden med samma konfiguration för alla kolonner visade på tydliga skillnader i uppehållstid (Kapitel 5). Det har framgått att det är möjligt att åstadkomma en omättad zon på 2 m i Gråbo genom att utnyttja kvarvarande material i täkten, vilket motiverade att ett dubbelprov sattes upp för 2 meters-konfigurationen. De två kolonner som uppvisade störst skillnad; K2 och K3, valdes för att få med en så stor variation som möjligt i undersökningen. Detta förstärkte också generaliseringen av olivinsandens verkan eftersom kolonnerna också var konfigurerade för 2 m omättad zon. Grundvattenytan reglerades in på olika höjder för att åstadkomma varierande djup av omättad zon i kolonnerna (Figur 3-2, Tabell 3-1, nedan). Lampor kopplades in ovanför dem med omättad zon för att imitera solljus ovanför bassänger, medan den mättade kolonnen skyddades mot ljus.

K0 fick problem med igensättningar under experiment 1 och modifierades därefter genom att den översta metern med material togs ur kolonnen. Därefter var höjden på gruspelaren i K0 ca 4,5 m istället för 5,4 m. Provtagningspunkternas namn ändrades



Figur 3-2. Kolonnkonfiguration under period 2 med olika mäktigheter av omättad zon i enbart Gråbomaterial. De provuttag som användes är markerade i figuren. Blå färg är mättad sand och brun är omättad sand. Gula prickar markerar uttag för tensiometrar och grusprov. Svarta prickar markerar uttag för vatten- och grusprov.

Tabell 3-1. Kolonnkonfiguration med avseende på omättad och mättad zon under period 2.

Beteckning	Kolonnbezeichnung under experiment:	Omättad zon (m)	Mättad zon (m)
Mättad	K0	0	5,4
Mättad efter förkortning	K0	0	4,5
4 m omättad	K1	4	1,5
2 m omättad	K2	2	3,5
2 m omättad	K3	2	3,5
1 m omättad	K4	1	4,5
2 m med 0,3 m IOCO	K5	2	0,5
2 m med 0,3 m IOCO	K6	2	0,5

till att stämma med beteckningarna med avseende på grundvattenyta och gruspelaryta.

3.5 Provuttagens utformning

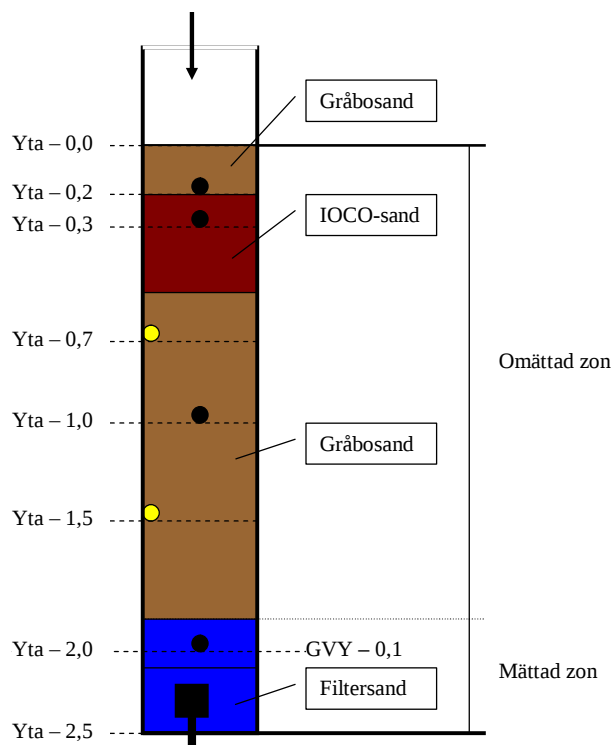
Vattenproven togs från slangar i mjuk PVC via rostfria rör (innerdiameter ca 5 mm) med öppningen instucken 15 cm in i kolonnen, vilket var centrum av kolonnen. Slangen gick från aktuellt provuttag upp till kolonnspecifik grundvattenyta, där prov sedan togs i det droppande vattenflödet. Nät i rostfritt stål sattes framför det rostfria röret inne i kolonnen för att hindra grus från att komma in i röret. Under period 2 byttes PVC-slang i princip en gång per månad för att motverka tillväxtproblem i slangarna, vilket inte skedde under period 1 eftersom den var kortare än period 2.

Provuttagen hade en diameter på 40 mm så att det även gick att ta prover av grusmaterial och montera tensiometrar. Tensiometrar (tryckmätning i omättad zon) installerades på olika nivåer (Yta-0,7m, Yta-1,5m, Yta-2,5m och Yta-3,5m) beroende på längden omättad zon. Uttagen var utrustade med lock för den mättade zonen.

3.6 Materialpåfyllnad i kolonnerna

Kolonnerna fylldes på upptill med hjälp av hinkar med material från Gråbo grustäkt. Vatten fylldes på

från botten för att driva upp luften mellan porerna och därmed minska risken för luftrelaterad igensättning. Påfyllnaden innebar även att en del av leran följde med upp ovanför ytan och ner i avloppet, vilket kan ha omlagrat materialet något och skapat tätare lokala lager med finmaterial. Olivinkolonnerna fylldes först med Gråbomaterial upp till den nivå där olivinsanden skulle vara. Påfyllnaden av Gråbomaterial genomfördes först till 2 m, varefter hydrauliken genom kolonnen testades innan 0,3 m olivinsand fylldes på. Det översta lagret med 0,2 m Gråbogräs tvättades först i hink innan det lades på olivinsanden.



Figur 3-3. Utformning av olivinkolonnerna K5 och K6. Gula prickar markerar uttag för tensiometrar och grusprov. Svarta prickar markerar uttag för vatten- och grusprov.

4 Geologisk karaktärisering

4.1 Introduktion

Materialet i kolonnerna togs ifrån Gråbodeltat vid sjön Mjörn i Lerums kommun, Västra Götaland. I deltat har täktverksamhet pågått sedan decennier tillbaka men 2002 upphörde verksamheten då täkt-tillståndet gick ut. När materialet hämtades från täkten var det inte tillåtet att ta material från täkt-sidorna och istället valdes ett siktat material med en storleksfördelning mellan 0 och 4 mm.

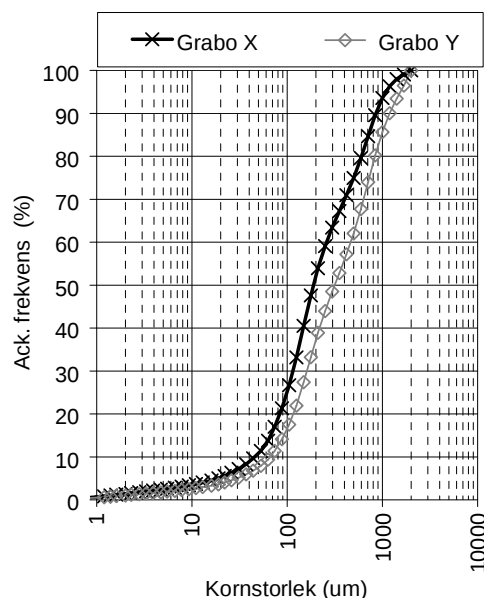
4.2 Metod

Materialet analyserades av KIWA Water Research i Nederländerna inom ramen för EU-projektet ARTDEMO, samt på Lackarebäcks Vattenverk med SS-standardmetod (Bilaga D). Laboratoriet på KIWA Water Research utförde laboratorieanalyserna av proven (ICP-MS, GC, XRF, Laser Beam Analysis, etc.) samt beräknade fram, utifrån existerande veder-tagna geokemiska modeller, relevanta värden som karaktäriserar det geologiska materialet i Gråbo. Analyser gjordes på två prov från sandmaterialet som användes till kolonnerna. Resultatet presenteras i bilaga G.

4.3 Storleksfördelning

Resultatet (Figur 4-1) visar en d_{10} mellan 0,044 mm och 0,074 mm och d_{60} mellan 0,210 och 0,500 mm, vilket ger en enhetsfaktor d_{60}/d_{10} på 6–7. Dock var 18 % större än 2 mm och en siktning utan det finare materialet, <0,063 mm, uppvisade d_{10} mellan 0,11 och 0,18 mm, och d_{60} mellan 0,46 och 0,86 mm, vilket ger d_{60}/d_{10} på mellan 2,6 och 7,8 (Bilaga D:1). Olivinsanden storleksfördelning redovisas i Bilaga D:2.

Ett normalt filtermaterial vid konstgjord grundvattenbildning med bassänginfiltration i Sverige, har en distribution på 0,2–2,0 mm, med $d_{10} = 0,35 \pm 0,03$ mm och $d_{60}/d_{10} = 2,5$ med ett maximum av 1 % mindre än 0,2 mm (Hanson 2000). Lerinnehållet ($\leq 0,008$ mm), enligt laserstråleanalys, låg mellan 2 och 3 %. Således var bedömningen att Gråbo-materialet hade finare fraktioner och var mer ograd-erat än en normal svenskt filtersand.



Figur 4-1. Kornstorleksfördelning (μm) av två prov från kolonnerna, analyserad med laser.

Bulkdensiteten uppmättes till 1526 kg/m^3 , vilket ger en total porositet på:

$$(1 - 1526/2600) \cdot 100 = 41 \%$$

om kompaktdensiteten antas vara 2600 kg/m^3 . Den specifika effektiva porositeten approximerades till 24 % genom att mäta den tömda volymen vatten ur en känd mättad sandvolym i kolonnen (Rådmark & Svensson 2003). Rådmark och Svensson beräknade teoretiskt den specifika ytan¹¹ till $1,23 \times 10^5 - 2,51 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

4.4 Mineral och bergart

Geokemisk analys av två prover från kolonn-materialet, genomfört av KIWA i Nederländerna,

¹¹ Hur mycket yta som det finns per volym av material.

Tabell 4-1. Fysikalisk och geokemisk data från två materialprov av kolonnmaterial.

	Medel korn storlek	Lerfraktion	pH- H ₂ O	Elektrisk konduktivitet H ₂ O	BOM	CaCO ₃	S _{tot}	FeS ₂
Beskr.	(<2 mm)	laser≤8um		20 °C				Max
Enhet	µm	%	–	µS/cm	%	%	mg/kg	mg/kg
Prov 1	202	3,08	6,80	46	0,03	0,229	61	112
Prov 2	299	2,27	6,44	47	0,06	0,144	20	33

Tabell 4-2. Utbyteskapaciteten för katjoner (CEC) och mineralsammansättning.

	CEC	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ca- silikat	Na- silikat	K- silikat	Mg- silikat	Kvarts/ Opal
Beskr.	Utbyte	Utbyte	Utbyte	Utbyte	Utbyte	Utbyte	ANORTIT	ALBIT	K-Fältspat	BIOTIT	SiO ₂
Enhet	meq/kg	meq/kg	meq/kg	meq/kg	meq/kg	meq/kg	%	%	%	%	%
Prov 1	12,81	0,12	0,09	9,81	2,75	0,024	5,66	27,08	16,35	9,03	40,14
Prov 2	9,95	0,09	0,07	7,62	2,14	0,019	5,70	26,14	16,07	8,70	41,83

är redovisade i tabell 4-1 och 4-2. Utbyteskapaciteten av katjoner (CEC) låg på 12,81 meq/kg med det största utbytet av Ca följt av Mg. Det organiska innehållet i materialet var lågt, enbart 0,03–0,06 % uttryckt som BOM (Bulk Organic Matter). Mineralkompositionen i materialet klassificerades som ursprunget från granit och gnejs och bestod av 40 % Kvarts, 27 % Albit, 16 % Kaliumfältspat, 9 % Biotit och 6 % Anortit.

4.5 Slutsatser

- Materialet uppvisade en liten variation mellan kolonnerna i storleksfördelning.
- Analys av mineralerna i sanden indikerade ett ursprung av granit/gnejs med 40 % kvarts och 27 % Na-silikater.
- Materialet hade en stor andel finmaterial; lerinnehållet låg på 2-3 % och d₁₀ låg kring 0,044–0,074 mm.
- Materialet innehöll ett relativt stort spann av storlekar och d₆₀/d₁₀>2,5.
- Det organiska innehållet var lågt.
- pH var neutralt.
- Materialet bedömdes geokemiskt stabilt med avseende på salter (låg konduktivitet).

5 Jämförbarhet – Period 1

5.1 Introduktion

Huvudsyftet med period 1 var att ta reda på hur stor variationen var mellan de olika kolonnerna när de var konfigurerade på samma sätt. Denna kunskap användes sedan för att välja vilken kolonn som skulle ha vilken omättad zon i den fortsatta studien.

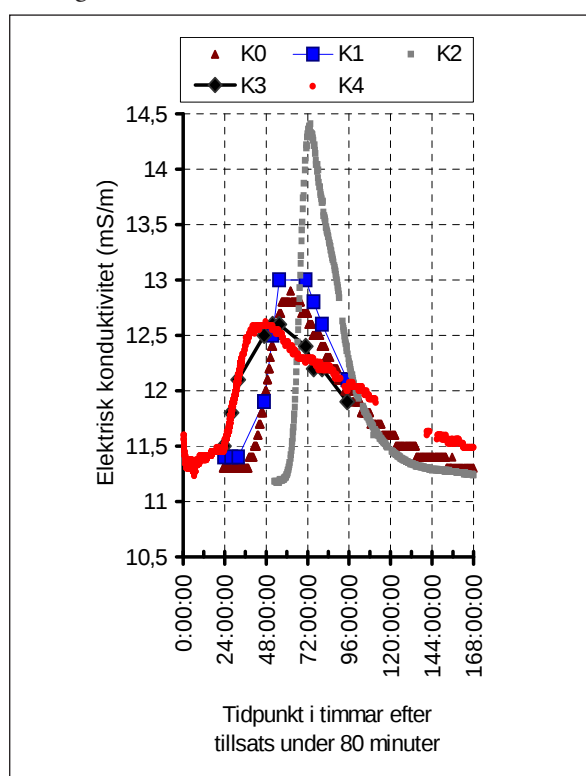
5.2 Metod

Prover togs mellan 2004-03-03 och 2004-05-14. Spårämnesförsök gjordes med tillsats av saltvatten; 0,85 g NaCl blandades i 2,5 l destillerat vatten, som tillsattes råvattnet under 80 minuter. Spårämnesresponsen mättes som konduktivitet med on-line-mätare i vattnet från bottenuttaget. Instrumenten var av märkena WTW Microprocessor Conductivity-Meter LF-96 och WTW Cond 340i. Vissa kolonner mättes kontinuerligt och andra intermittent.

Prov av vattnet togs från uttagen strax under grundvattenytan (GVY-0,1 m) och i botten på kolonnen (GVY-3,5 m). Bestämning av kornstorleksfördelningen gjordes med standardmetod och redovisas i kapitel 4 Geologisk karaktärisering.

5.3 Spårämnesförsök

Responskurvorna (Figur 5-1) skiljde sig mellan de olika kolonnerna, både i form på kurvan och när maximivärdet uppnåddes (Tabell 5-1). Störst skillnad var det mellan K2 och K4. K2 hade en smal och hög topp som kom efter 74 h. Kurvan för K4 hade en låg och mer utspridd form med en topp efter 48 h. Variationen mellan kolonnerna låg inom drygt ett dygn. Skillnaderna hade troligen att göra med att materialet packats olika vid påfyllnaden av grus. Dock var troligen skillnaden inte större än vad som existerar i en naturlig grustäkt, även i ett betraktat homogent material.



Figur 5-1. Responskurvor från spårämnesförsök med NaCl under period 1. Saltet har passerat 2 m omättad zon och 3,5 m mättad zon för alla kolonner.

Tabell 5-1 Maxima på kurvorna i timmar (Figur 5-1).

K0	K1	K2	K3	K4
63	60	74	52	48

Gruspelarna hade en diameter på 0,3 m, en höjd på 5,4 m och en porositet på 41 % (Kapitel 4), vilket ger en hålvolym på ca 159 l, vilket motsvarar ungefär 29 l per meter gruspelare. Om det approximativa värdet 56 % mättnad av effektiv porositet används för 2 m omättad zon (se Kapitel 6) och 100 %

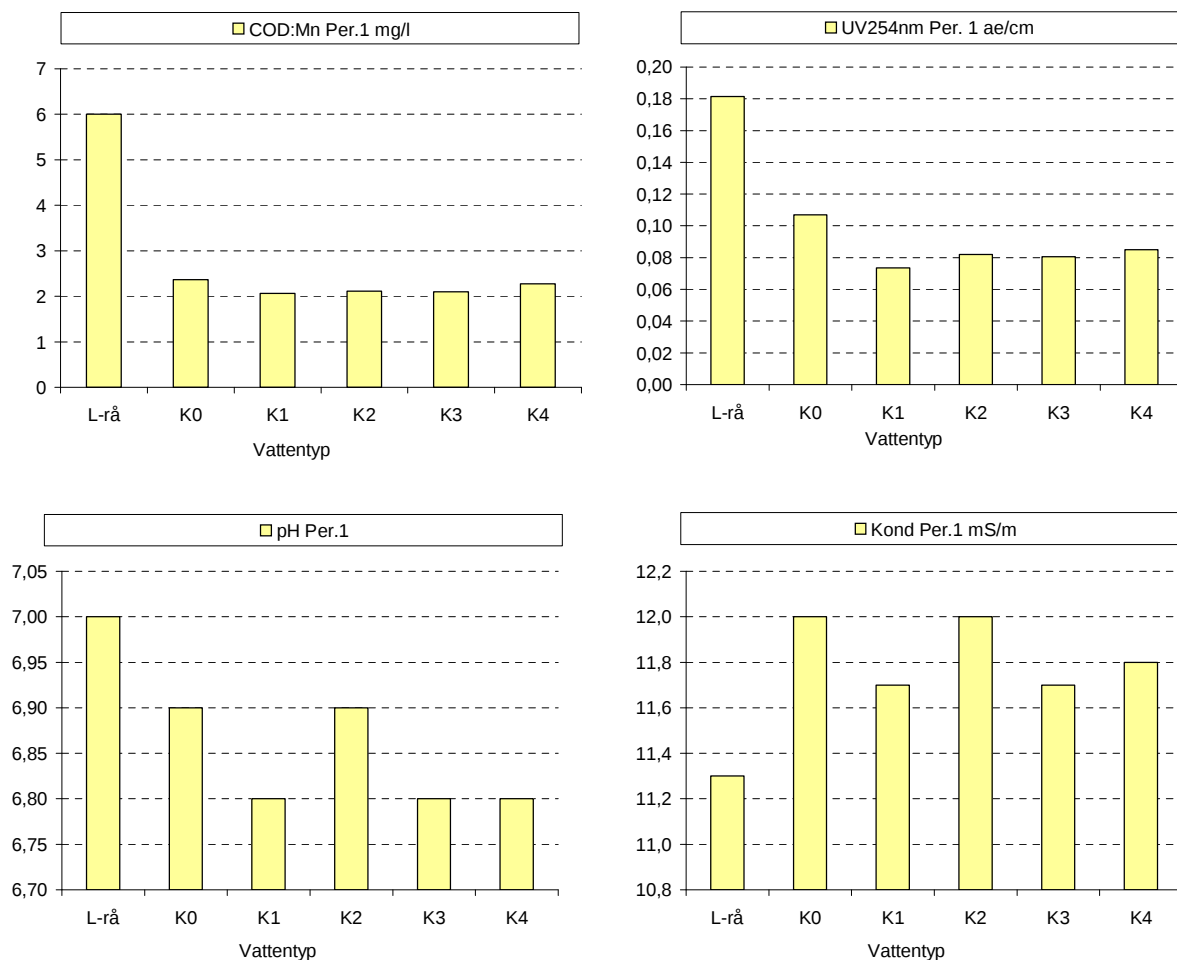
mättnad används för 3,5 m mättad zon, får man ca 79 l aktiv vattenvolym i pelaren, vilket ger en teoretisk uppehållstid på $T=79/0,025/60=53$ h, vilket hamnar vid maximum för K3. Vid tömning av kolonnen mättes mängden vatten som rann ut från 3,5 m mättad zon till mellan 54 och 58 l för alla kolonner. Således stämde teoretisk uppehållstid med de uppmätta.

5.4 Vattenkvalitet

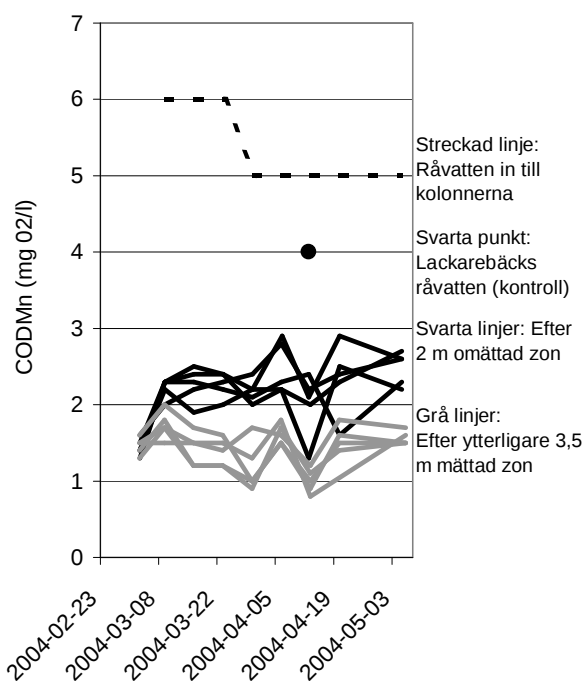
Utvalda vattenkvalitetsparametrar analyserades för att se om kolonnerna arbetade lika (Figur 5-2, nedan). Nio prover togs över perioden 2004-03-03 till 2004-05-14. Skillnaderna mellan kolonnerna var obetydlig för organiskt material (COD_{Mn} , UV 254 nm), pH och konduktivitet. För organiskt material låg mediankoncentrationen på ca 2 mg/l för alla kolonner för en ingående halt på 6 mg/l, vilket pekar på en avskiljning på 67 % för 2 meter omättad zon. För UV_{254} låg utgående mediankoncentration på 0,08 till 0,10 ae/cm för en ingående halt på 0,18 ae/cm, vilket tyder på en avskiljning på 50 %. Skillnaden i pH var en tiondel av en pH-enhet, vilket kan betraktas som obetydlig, och konduktiviteten låg mellan 11,6 och 12,0, vilket också är litet i sammanhanget. Sammantaget tycks kolonnerna ha verkat ungefärligen lika, trots observerade skillnader i vattnets transporttid. Figur 5-3 (nedan) presenterar resultatet av COD_{Mn} i realtid som visar att kolonnerna reagerade lika, både efter omättad zon och efter omättad zon + mättad zon.

5.5 Slutsatser

Resultatet från spårämnesförsöken visade på en variation i uppehållstid mellan kolonnerna. Variationen betraktades som "naturlig" med avseende på de variationer som står att finna i en deltaformation motsvarande Gråbo, och för det viktiga fallet – 2 meter omättad zon – valdes de två kolonner upp som visat den största skillnaden i uppehållstid, för att undersökningen även skulle omfatta denna "naturliga" variation.



Figur 5-2. Medianvärdet för nio prov för några ämnen och parametrar under period 1 2004-03-03 till 2004-05-14. Kolonnerna var inställda på 2 m omättad zon + 3,5 m mättad zon och värdena avser 2 m omättad zon. K5 och K6 ingick inte i studien. L-rå är råvatten till Lackarebäckens vattenverk och kolonnerna.



Figur 5-3. COD_{Mn} under period 1. Koncentrationen organiskt material (COD_{Mn}) för alla kolonner under period 1.

Siktning (Kapitel 4) av material visade att materialet hade samma kornstorleksfördelning oavsett när provet tagits vid påfyllnaden i kolonnen. Spårämnesförsöket visade en variation mellan kolonnerna som antyder en skillnad i täthet i kolonnerna. Orsaken till om-lagringen ligger sannolikt i påfyllningsmetoden för vatten och grus. Dock, genom noggrann observation av uppehållstiden, som är en konsekvens av packning och porositet, kunde studien kontrolleras med avseende på denna variation.

Resultatet av vattenkvalitets-parametrarna demonstrerade att kolonnerna reagerade lika för lika konfiguration och att en direkt jämförelse var möjlig.

Så var det dags för period 2 där konfigurationen för kolonnerna ändrades med avseende på omättad zon.

6 Hydrogeologisk karaktärisering

6.1 Introduktion

För att karaktärisera det hydrauliska beteendet i kolonnerna utfördes spårämnesförsök. Tryckförhållandena i kolonnen undersöktes under studien för att kontrollera att den omättade zonen inte mättades.

I rapporten i övrigt har konsekvent beteckningarna 1, 2 och 4 m zon använts för att öka läsbarheten men i realiteten låg djupet ca 0,1 m under angivet mått, t.ex. 0,9 m för 1-metersfallet. Eftersom det var viktigt att relatera den faktiska hastigheten till den faktiska längden har det verkliga värdet använts i detta kapitel.

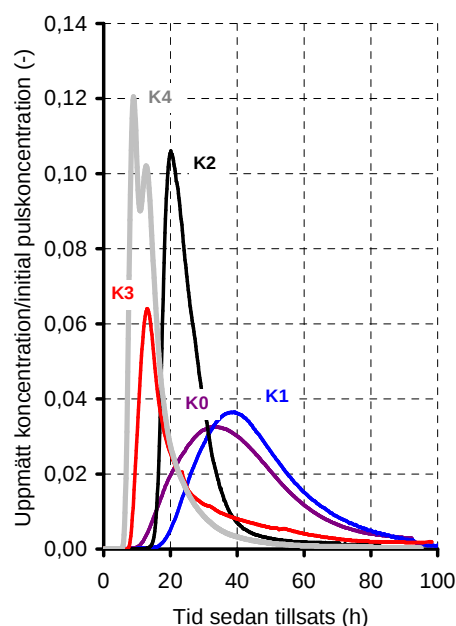
6.2 Metod

Den elektriska konduktiviteten i det utgående vattnet mättes on-line med konduktivitetmätare. Från spårämnesförsöket beräknades $T_{50\%}$, d.v.s. den tid då 50 % av den totala mängden detekterat spårämne uppmätts (Tabell 6-1). Transporten i kolonnerna skedde under omättade förhållanden som gör att Darcy's lag för beräkning av hydraulisk konduktivitet måste kompenseras för vattenmättnad. Beräkning av den hydrauliska konduktiviteten genomfördes med datorsimulering i grundvattenmodellen MIKE SHE inom ramen för ett annat VA-Forskningsprojekt (23-128 under produktion).

För att ha kontroll över den omättade zonen mättes trycket med tensiometrar. Då materialet var omättat rädde ett undertryck och ju lägre mättnadsgrad desto högre undertryck. Principen med tensiometrar bygger på att vattnet som tillförs en porös keramisk kapsel hamnar i en jämvikt med omgivande jordmaterial. Det betyder att om det är en omättad situation, transporteras vatten från keramikroppen ut i sanden och ett undertryck uppstår i tensiometern. Tensiometrar var installerade i alla sido-uttag, d.v.s. enligt beteckningarna i Figur 3-2: Yta-0,7 m, 1,5 m, 2,5 m och 3,5 m beroende på längden omättad zon.

Tabell 6-1. Uppehållstider för kolonnerna under period 2.

Kolonn	Zonlängd (m)	Uppehållstid $T_{50\%}$ (h)
K0	1,9 m mättad	39
K1	3,9 m omättad	44
K2	1,9 m omättad	24
K3	1,9 m omättad	20
K4	0,9 m omättad	13



Figur 6-1. Uppehållstider i studerade zoner under period 2. Kolonnummer är utmärkt bredvid aktuell kurva.

6.3 Uppehållstid

Uppehållstiden, $T_{50\%}$, för de studerade zonerna varierade mellan 13 h för den kortaste omättade zonen på 0,9 m till 44 h för den längsta omättade zonen på 3,9 m (Figur 6-1). Att uppehållstiden för 1,9 m mättad zon var nästan lika lång som för 3,9 m omättad zon beror troligen på den större vattenmängden som skulle omsättas i den mättade zonen.

Simuleringar i grundvattenmodell resulterade i en hydraulisk konduktivitet mellan $0,4 \times 10^{-4}$ och $1,5 \times 10^{-4}$ m/s för ett uppmätt tryckfall på 4–15 cm/m i mättad zon vid ett flöde på 25 ml/min; motsvarande 0,5 m/d i infiltrationshastighet, en antagen total

porositet på 37 %¹² och en effektiv porositet mellan 22–32 %.

6.4 Vattenmättnad i omättad zon

Eftersom flödet Q (m^3/s) var konstant för alla kolonner bör följande samband ha gällt för aktiv vattenvolym V (m^3) i kolonnen och uppehållstiden T (s) i kolonnen:

$$Q = V_{\text{omättad}}/T_{\text{omättad}} = V_{\text{mättad}}/T_{\text{mättad}}$$

Således gjordes följande jämförelse mellan uppehållstiden för 2 m mättad zon (K0) och 2 m omättad zon (K2 och K3):

$$V_{\text{omättad}}/V_{\text{mättad}} = T_{\text{omättad}}/T_{\text{mättad}}$$

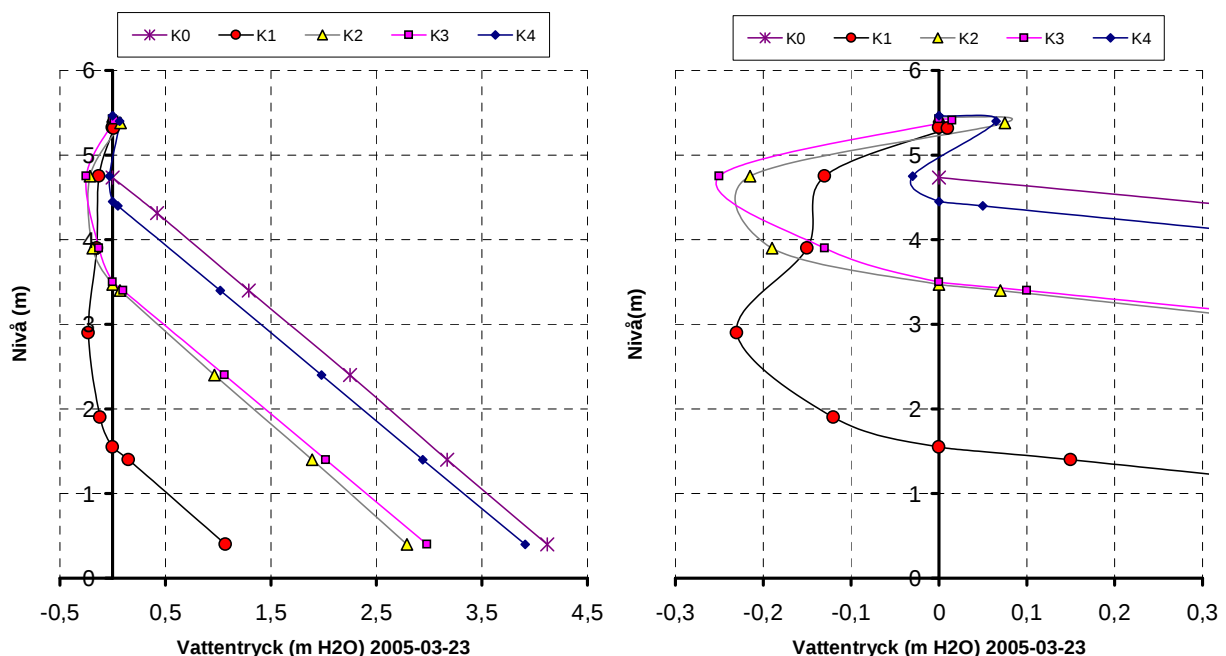
Beräkningarna utifrån uppmätt $T(50\%)$ i Tabell 6-1 gav att mättnaden av totalporositet under försöket troligen var:

$$T(\text{medel K2 och K3})/T(K0) = 22/39 = \text{ca } 56\%$$

Om 56 % av totalporositeten på 41 % var mättad låg mättnadsgraden på 23 %, vilket var nära den effektiva porositeten. Tryckmätningen 2005-03-23 (Figur 6-2) visade att det rådde ett undertryck i den omättade zonen på upp till ca –25 cm vattenpelare. Ju kortare omättad zon (t.ex. K4) desto närmare ett mättat tillstånd, d.v.s. en längre omättad zon tycks ha gynnat ett omättat tillstånd. Mätningar genomfördes regelbundet. Okulär besiktning av provuttagen gjordes och om vatten rann ut från uttagshålen, berodde det på tillfälliga incidenter i samband med igensättningar etc. Generellt gällde att provuttagen inte läckte och därmed att omättat tillstånd rådde.

6.5 Slutsatser

- Upphållstiden för 0,9–3,9 m omättad zon låg på 13–44 h.
- Upphållstiden för 1,9 m mättad zon låg på 39 h.
- Numeriska beräkningar i grundvattenmodellen MIKE SHE resulterade i en hydraulisk konduktivitet under mättade förhållanden på mellan $0,4 \times 10^{-4}$ och $1,5 \times 10^{-4}$ m/s för kolonnerna.



Figur 6-2. Typisk tryckkurva under studien, uppmätt i slangar och tensiometrar 2005-03-23. Nivå korrelerar till höjd från botten av kolonn. Höger diagram är en förstoring av vänster diagram.

12 Detta antagande är byggt på en annan metod att bestämma den totala porositeten än tidigare beräkning (s.19), vilket gör att resultaten skiljer sig något.

- Medelmättnaden för 2 m omättad zon uppskattades till ca 56 % av total porositet.
- Tryckmätningar visade på ett omättat tillstånd med ett vattenundertryck på ner till ca -25 cm vattenpelare.

7 Vattenkvalitet vid infiltration av Delsjövatten

7.1 Introduktion

Kolonnerna fick råvatten från Delsjöarna under de perioder då inga tillsatsexperiment genomfördes. Denna redovisning bygger på resultatet av de vattenprover som löpte regelbundet per vecka, varannan vecka och månad, för att bygga upp en kunskap om behandlingseffektiviteten vid infiltration av ett västsvenskt sjövatten, i detta fall Stora och Lilla Delsjön i Göteborg. Trots påverkan från älvvatten som pumpas upp från Göta älv för Lackarebäcks behov, avviker inte kvaliteten i Delsjöarna väsentligt från ett västsvenskt sjövatten som Mjörns (Dahlberg & Lundh 2005).

7.2 Metod

Analyserna utfördes på Göteborgs va-verks ackrediterade laboratorium på Lackarebäckverket. TOC-analyser utfördes av Alcontrol i Uddevalla. Provtagningen var definierad i paket beroende på frekvens, se Bilaga A. I detta kapitel presenteras typiska grundvattenparametrar som kan vara relevanta för förståelsen för hur Gråbomaterialet kommer att bidra till vattenkvaliteten i en framtida anläggning med konstgjord grundvattenbildning. Jämförelsen gjordes mellan kolonner med enbart gråbosand och kolonner med gråbosand inkluderat med 0,3 m med IOCO-sand (järnoxidtäckt olivinsand). Vidare gjordes en

analys av effekten av en varierad omättad zon. I bilaga C finns uppställt kvalitetsdata i tabell med statistisk data på de parametrar och ämnen som mättes under driften av kolonnerna.

Kolonnerna har jämförts, från mars 2004 till augusti 2005, med varandra och med råvattnet, både med provtagningar från råvattnet i pilotanläggningen och med data från Lackarebäcks vattenverk. Analyser under försöksperioderna har inte använts i denna sammanställning p.g.a. extrema koncentrationer och kraftig dynamik i jämförelse med normal-situationen för driften med Delsjövattnet. Således är analysen en utvärdering av kolonnernas respons av filtrering av Delsjövatten. Analyser för följande perioder i undersökningen ingår i sammanställningen:

1. Period 1: 2004-03-03 till 2004-05-05
2. Period 2:
 - a. 2004-06-08 till 2004-10-27 (före tillsatser),
 - b. 2004-12-07 till 2005-02-08 (mellan tillsats 1 och 2)
 - c. 2005-07-05 till 2005-08-24 (efter tillsatser 3 men innan tillsatsexperiment 4 Avloppsspikning september 2005)
1. Olivinkolonnerna: 2005-04-05 till 2005-08-24 (prover då inte experiment pågick)

Olivinkolonnerna K5 och K6 kom inte i bruk förrän i mars 2005 och den första provtagningen gjordes 2005-04-05. De andra kolonnerna hade då varit i bruk sedan april 2004, vilket bör observeras i tolkningen av resultatet. Det betyder att inkörda kolonner (K0-K4) jämförs med relativt nystartade (K5 och K6). I diagrammen jämförs den specifika perioden för K5 och K6 med motsvarande period för råvatten.

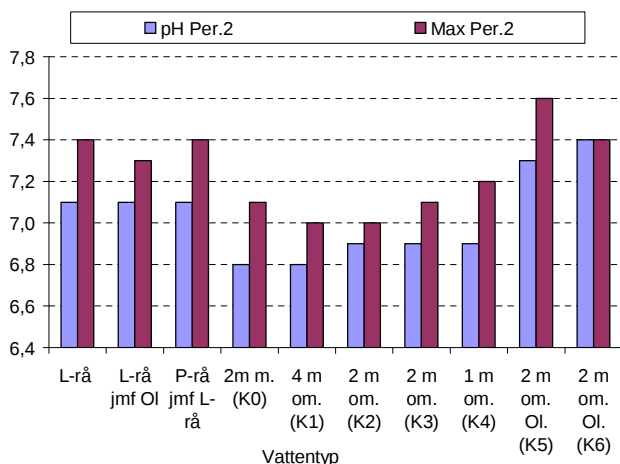
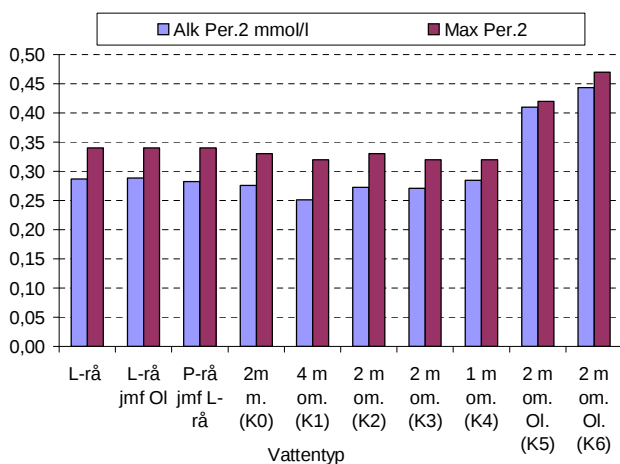
I diagrammen visas på x-axeln den konfiguration för omättad zon som gällde för period 2. I jämförelsen med period 1 gäller hänvisningen till kolonn och inte till djup av omättad zon då alla var satta till 2 m omättad zon under period 1. I diagrammen redovisas Lackarebäcks råvatten (L-rå) som också utgjorde råvatten till kolonnerna. En jämförelse görs av Lackarebäcks råvatten och kolonnernas (pilotanläggningens) råvatten (P-rå) för att visa att kvaliteten inte förändrades drastiskt före beskickning. Eftersom kolonnerna med IOCO-sand togs i bruk i ett senare skede, redovisas även vattenkvaliteten för Lackarebäcks råvatten för denna specifika period (L-rå jmf Ol). Få prover togs på P-rå varför L-rå användes som jämförelse i analysen.

7.3 Råvatten

Råvattnet från Delsjöarna under perioden (Bilaga C) för undersökningen var mjukt och uppvisade en temperaturvariation mellan 2 och 20 °C. Belastningen av organiskt material var låg; COD_{Mn} låg på ca 5–7 mg/l och halterna av metaller och salt var låga. Den mikrobiologiska kvaliteten var god med låga halter fekala indikatororganismer, med undantag av en enskild relativt hög detektion av *Cl.perfringens*. Låg turbiditet, <1 FNU och neutral pH ca 7,1. Alkaliniteten låg runt 0,25 mmol/l.

7.4 Period 2

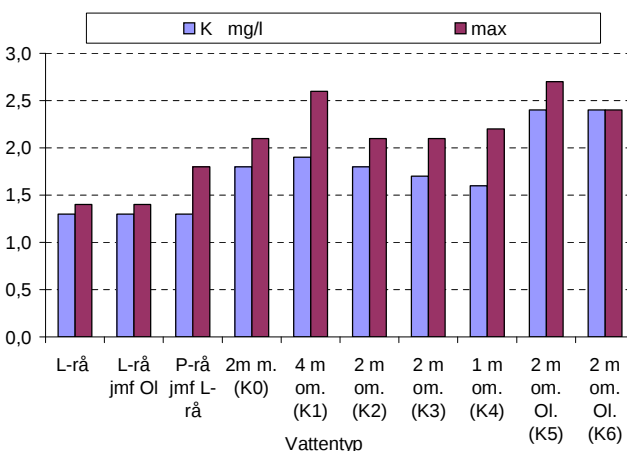
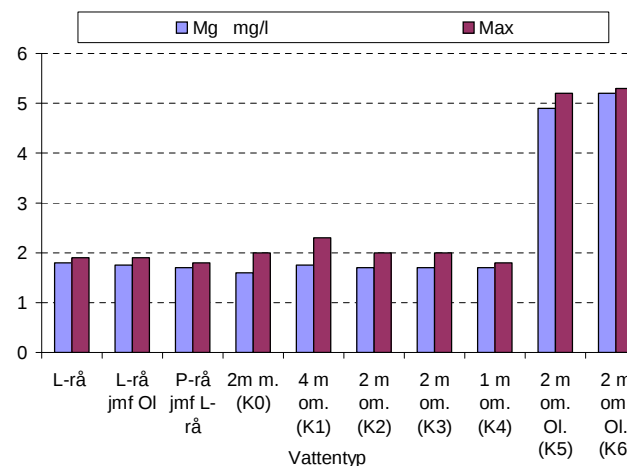
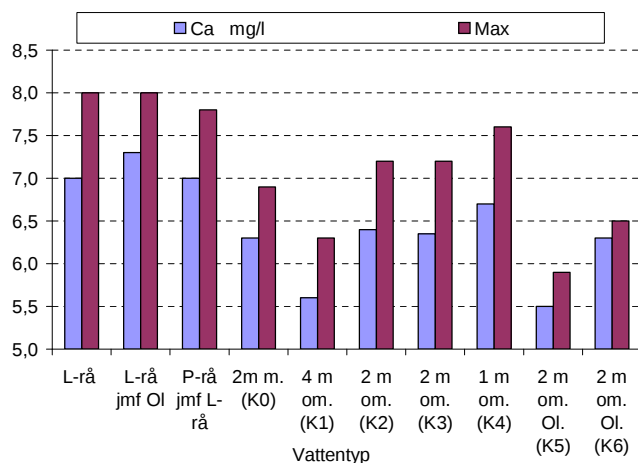
Medeltemperaturerna i utgående vatten från kolonnerna låg kring 20°C för aktuell period, vilket var



Figur 7-1. Median- och maxkoncentration av alkalinitet och pH då kolonnerna belastades med råvatten Delsjöarna. m=mättad, om=omättad.

högre än råvattnets. Detta beror på att kolonnerna var placerade inomhus. Turbiditet och färg upphörde att vara användbara parametrar då de stördes kraftigt av finmaterial (lera) som läckte ut i utloppen.

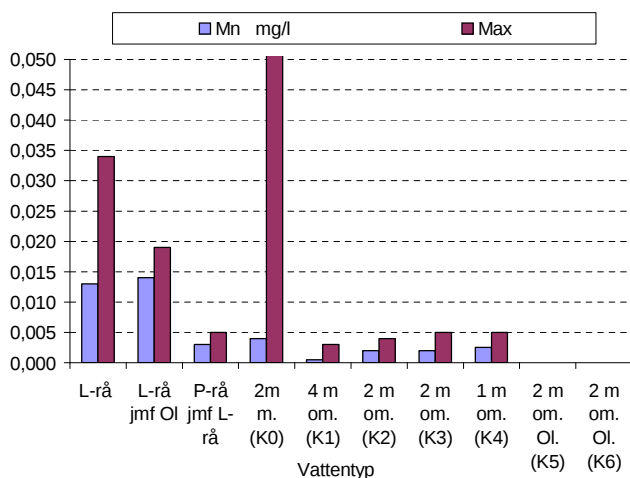
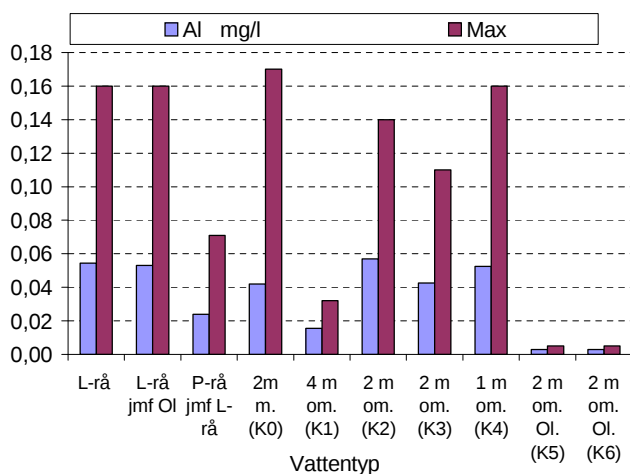
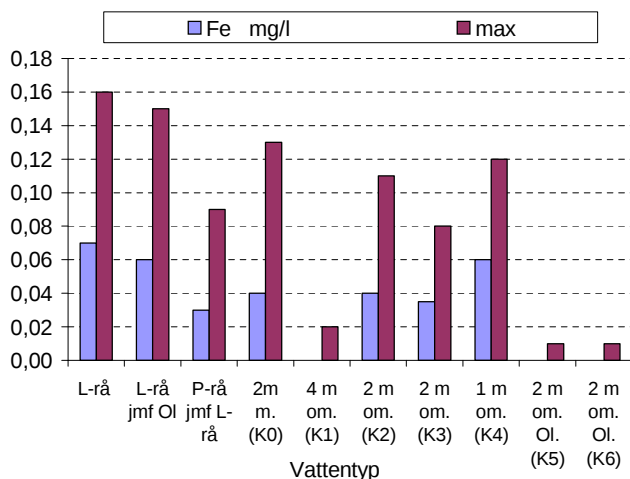
I Gråbosand minskade pH till ca 6,8 men ökade i IOCO-sand till 7,4 (Figur 7-1), vilket också återspeglas i alkaliniteten där framförallt IOCO-sanden uppvisade en signifikant ökning medan minskningen



Figur 7-2. Median- och maxkoncentration av kalcium, magnesium och kalium då kolonnerna belastades med råvatten Delsjöarna. m=mättad, om=omättad.

i Gråbosand var mindre tydlig. Omättad zon skilde sig inte från mättad.

Både magnesium och kalium ökade markant i IOCO-sand. I Gråbosand ökade möjligen kalium men magnesium lämnades oförändrad (Figur 7-2). Även natrium ökade något för IOCO-sand men var oförändrad för Gråbosand medan kalcium tycks ha



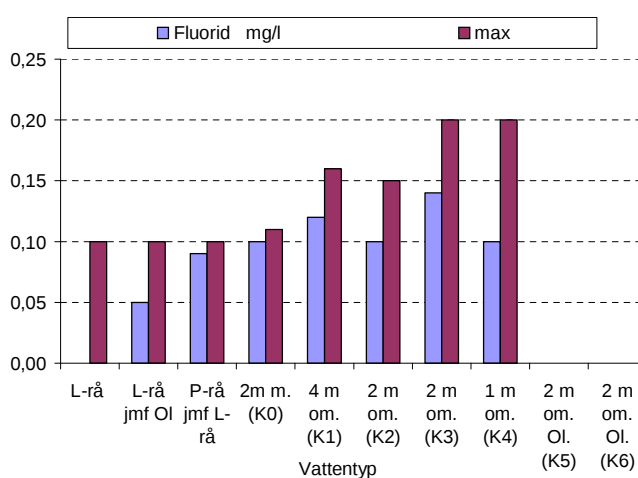
Figur 7-3. Median- och maxkoncentration av järn, aluminium och mangan då kolonnerna belastades med råvatten från Göta älv och Delsjöarna.

minskat generellt. Omättad zon skilde sig inte från mättad.

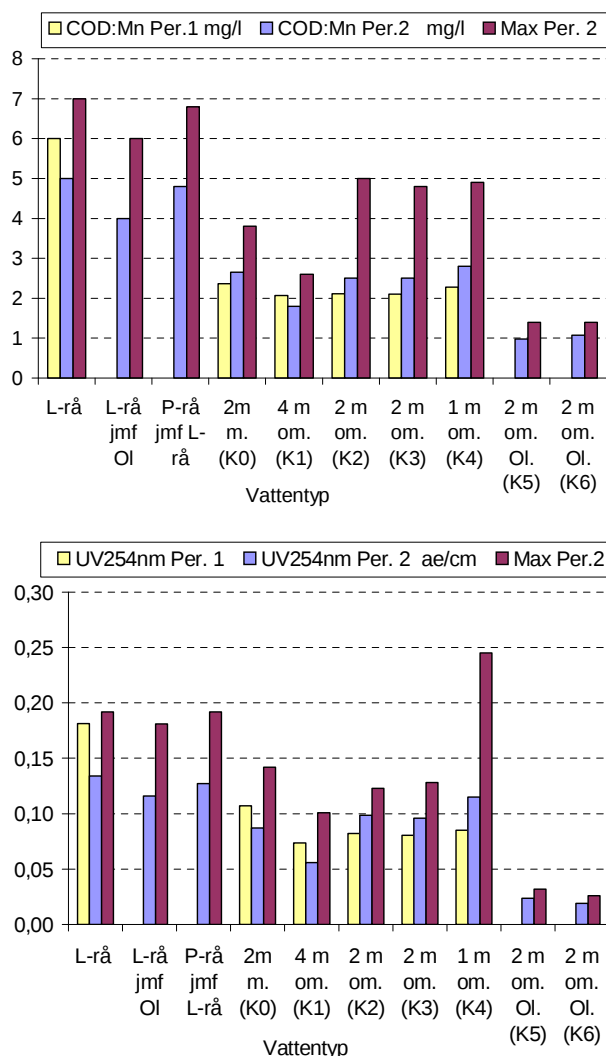
Aluminium och järn minskade framförallt i 4 meter omättad zon och i IOCO-sand medan mangan hade en signifikant ökning i mättad zon (Figur 7-3), vilket förmodligen berodde på syrefattiga förhållanden (Figur 7-6, nedan). Ökningen av magnesium och kalium i IOCO-sand samt den observerade minskningen av järn, aluminium och kalcium, indikerar ett katjoniskt utbyte mellan materialets magnesium och kalium och vattnets aluminium, järn och kalcium.

Fluorid ökade möjligen i Gråbosanden (Figur 7-4). Det upptäcktes en antydning till att IOCO-sanden tog upp fluorid men antalet prov var få och resultatet därför osäkert. Fosfor ökade i både Gråbosand som i IOCO-sand men omättad zon tycks ha hämmat utsöndring. Konduktiviteten påverkades försumbart i Gråbosand medan en liten ökning kunde skönjas i kolonnerna med IOCO-sand. Sulfat ökade i IOCO-sand medan det i Gråbosand var svårt att se någon trend. På parametern totalkväve syns möjligen en osäker minskning i IOCO-sand men en trolig ökning i den mättade kolonnen som också uppvisade en tydlig uppgång i ammonium. Hydrokemin tyder på en mer aktiv geokemi i sand med lager av IOCO-sand än i Gråbosanden.

Det syntes tydligt en signifikant sänkning av koncentrationen COD_{Mn} , TOC och $\text{UV}_{254\text{nm}}$ i Gråbosanden och en ännu större sänkning efter kolonnerna med IOCO-sand (Figur 7-5, nedan). Trots att variationen, som uppmättes under period 1, låg i närheten av vad som sedan observerades i period 2, tyder resultatet på att 4 m omättad zon avskiljde mer än



Figur 7-4. Median- och maxkoncentration av fluorid då kolonnerna belastades med råvatten från Göta älv och Delsjöarna.



Figur 7-5. Median- och maxkoncentration av organiskt material då kolonnerna belastades med råvatten från Göta älv och Delsjöarna.

2-meterfallen. Resultatet tyder inte på att omättad zon skulle ha varit bättre än mättad zon då 2-meterfallen var relativt lika. Tydligt är att IOCO-sand hade en kraftig påverkan på organisk material. Detta analyseras mer ingående i ett eget kapitel.

Den mikrobiologiska belastningen på råvattnet var väldigt låg. Trots det upptäcktes koliformer vid ett tillfälle efter 1 m omättad zon; den kortaste omättade zonen. Varken E.coli eller Enterokocker upptäcktes under perioder utan tillsatsexperiment men Cl.perfringens detekterades efter 1 och 2 meter av omättad zon. Fekala indikatorbakterier detekterades inte någon gång i 4 m omättad zon.

Stora fluorescerande partiklar (1–15 µm) återfanns i alla kolonner i låga koncentrationer och små (0,4–1 µm) i anmärkningsvärt höga koncentrationer, men huruvida dessa kom från inkommande råvatten, från tillväxt i de transparenta slangarna eller om det var något mineral är inte klart. IOCO-sand

uppvisade en relativt mycket lägre halt än Gråbo-sand, men det kan bero på att drifttiden var mycket kortare för olivinkolonnerna.

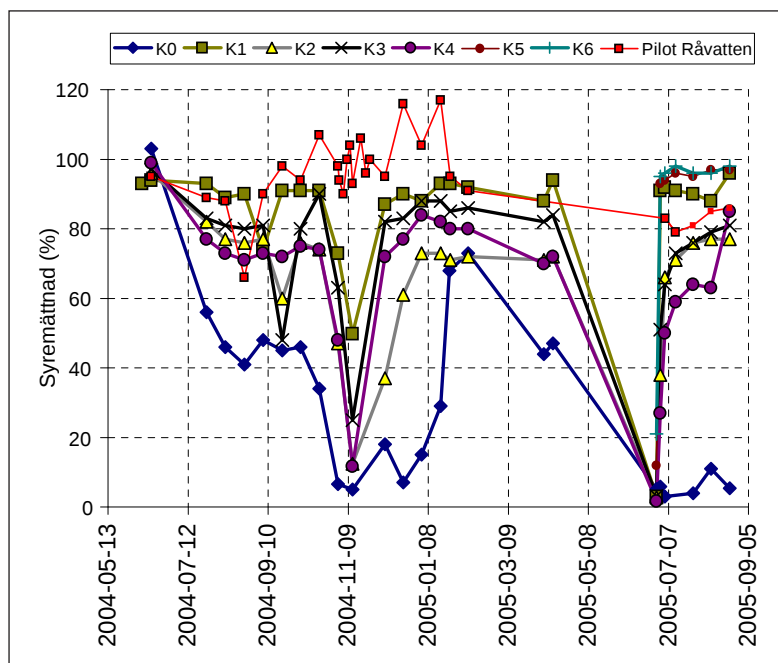
Sammantaget uppvisade 4 m omättad zon och olivinkolonnerna konsekvent bäst avskiljning av fekala organismer.

7.5 Syre under period 2

Syrehalten i utgående vatten från botten av kolonnerna mättes under period 2 då kolonnerna hade olika djup av omättad och mättad zon. Bottenuttaget visade sig var lämpligast för syreprovtagning. Resultatet (Figur 7-6) visar data i vattnet efter passage i omättad + mättad zon. Under tillsatsexperimenten stängdes bottenuttaget på kolonnen och uttaget för den specifika undersökningen, oftast strax under grundvattenytan, användes under hela försöket. Under den tiden omsattes inte vattnet i den mättade zonen. Inga syreprov togs under tillsatsexperimentet eftersom provet bedömdes störa den övriga provtagningen.

När kolonnerna var inställda på flöde genom hela kolonnen låg syremättnaden i regel över 60 % i kolonner med omättad zon. I den mättade kolonnen (K0) var syremättnaden i regel lägre. Under tillsatsexperimenten, då botten var avstängd, uppstod låga syrehalter i den mättade zonen, vilket märktes när syret började mätas igen efter tillsatsexperimenten. Återhämtningen till högre syrehalt var relativt snabb för de omättade zonerna. I K5 och K6 mättes syrehalten 0,5 m under vattenytan, eftersom kolonnerna inte var längre. Resultatet visar en hög och jämn syremättnad.

Råvattnet in i kolonnerna droppade med ett flöde på 25 ml/min genom minst 0,5 m syremättad atmosfär, för att landa i en pöl i kontakt med atmosfären. Sättet att tillsätta råvattnet gjorde att syremättnaden vid inloppet till kolonnen antogs vara 100 % under försöket, vilket också mätningarna i råvattnet till kolonnerna (pilot råvatten) tycks verifiera.



Figur 7-6. Syremättnad i botten av kolonnerna under experimentet.

7.6 Slutsatser

Med råvatten från Delsjövatten som infiltrerades i kolonnerna kunde följande observeras:

- pH sjönk i Gråbosand men ökade i IOCO-sand, vilket också återspeglades i alkaliniteten.
- Resultatet tyder på ett katjoniskt utbyte i IOCO-sand mellan sandens magnesium och kalium och vattnets aluminium, kalcium och järn.
- Natrium påverkades ej nämnvärt.
- Mangan hade en tydlig ökning i mättad zon, vilket sannolikt kan förklaras av syrefattiga förhållanden. I Gråbosand med och utan IOCO-sand, tyder resultatet på en liten avskiljning av mangan.
- Fluorid ökade möjligen något i Gråbosand men tycks ha avskiljts i IOCO-sand. Dock var ingående värden låga och antalet analyser få, vilka gör analysen osäkert.
- Fosfor ökade i både Gråbosand och IOCO-sand. Resultatet tyder på att omättad zon hämmade ökningen av fosfor.
- Konduktivitet och klorid var oförändrade i Gråbosand medan en minskning av klorid märktes i IOCO-sand. Konduktiviteten visade en liten ökning i IOCO-sand.
- Sulfat ökade i IOCO-sand medan det i Gråbosand var svårt att se någon trend.
- Hydrokemin tydde på en mer aktiv geokemi i IOCO-sand.

- Organiskt material reducerades påtagligt i Gråbosand men ännu effektivare i IOCO-sand. Det märktes en tydlig trend med avseende på djup av omättad zon, där en djupare zon gav större reduktion.
- Resultatet tyder inte på att omättad zon generellt för de studerade parametrarna skulle varit bättre än mättad zon då 2-meterfallen, mättade som omättade, visade relativt lika avskiljning.
- Mättade förhållanden i Gråbosand uppvisade en tydlig uppgång i ammonium.
- Den mikrobiologiska belastningen på råvattnet var låg. Sammantaget uppvisade 4 m omättad zon och IOCO-sand konsekvent bäst avskiljning av fekala indikatororganismer.

8 Reduktion av bakteriofager

8.1 Introduktion

Syftet med undersökningen var att studera reduktionen av virus i sand från en typisk västsvensk glacial

avlagring lämplig för konstgjord grundvattenbildning med bassänginfiltration. Målet var att utvärdera om reduktionen var mer effektiv i omättad zon än i mättad, om det fanns en avgörande skillnad beroende på djup av omättad zon samt om IOCO-sand kunde höja effektiviteten i en begränsad omättad zon.

8.2 Metod

Undersökningen genomfördes i sju kolonner; en kolonn (K0) med 2 meter mättad zon i Gråbosand, fyra kolonner (K1–K4) med skillnad i djup av omättad zon i Gråbosand på 1 m, 2 m (2 kolonner) och 4m, och två kolonner (K5–K6) med 0,3 m med IOCO-sand inlagrad i två meter omättad zon av Gråbosand. De olika zonerna hade en faktisk höjd på 0,9, 1,9 och 3,9 m men är i texten refererade till 1, 2 och 4 m för en ökad läsbarhet av rapporten.

Kolonnerna undersöktes med pulsresponsexperiment genom tillsättning av bakteriofager MS-2 och ΦX174 som modellvirus. Den hydrauliska belastningen var 25 ml/min, vilket motsvarade en infiltrationshastighet på 0,5 m/d genom en infiltrationsbädd med ytan ca 0,07 m². Experiment genomfördes i november till december 2004 (experiment 1), februari till april 2005 (experiment 2) och maj till juli 2005 (experiment 3). Lösningen med fager tillfördes kolonnerna i 40 minuter under experiment 1 och 2. Under experiment 3 tillsattes lösningen under 7 dygn för att uppnå konstanta tillstånd av reduktion. Koncentrationerna redovisas i tabell 8-2 och i resultatdiagrammen. Provtagningen var planerad för att täcka in stigning, topp och nedgång i koncentration. Den hydrauliska uppehållstiden (HRT=Hydraulic Retention Time), uttryckt som T_{50 %}, som tidigare utvärderats med natriumklorid (Kapitel 6 Hydrogeologisk karaktärisering) korrelerades till reduktionen för analysen av sambandet mellan reduktion och djup av mättad zon och jämförelsen mellan mättad zon och IOCO-påverkan. Parametern T_{50 %} syftar till den tid då 50 % av den uppmätta totala mängden av NaCl passerat kolonnen vid ett spårämnesförsök.

Efter experiment 1 och 2 uppstod tveksamhet om huruvida utgående koncentration som svarade mot den ingående pulsen, faktiskt hade nått maximumnivå, vilket var nödvändigt för att en reduktion skulle

kunna beräknas utifrån skillnaden mellan ingående och utgående koncentration. Vidare visade experiment 2 en diskrepans i massbalansen mellan tillsatt och uppmätt massa (totala antalet uppmätta plackbildande enheter) som indikerade ett större antal fagpartiklar ut än in. Detta fenomen kan ha berott på förhöjda och varierande koncentrationer av organiskt material och/eller salt.

Även om beräkningen av reduktionen, se nedan, baserades på skillnaden i responsmaximum mellan kolonnerna, vilket reducerade inflytandet av en eventuell variation i pulsen, fanns behovet att validera resultatet i experiment 1 och 2 med ett något annorlunda experiment. Experiment 3 utfördes därför med en kontinuerlig och konstant puls under 7 dagar i ett försök att uppnå ett konstant reduktionstillstånd där den uppnådda utgående koncentrationen för varje kolonn kunde jämföras med de andra. I detta försök jämfördes den mättade kolonnen (K0) och olivinkolonnerna (K5 och K6) med de omättade kolonnerna (K1–K4). Tillsatskoncentrationen av fager valdes till att vara flerfaldigt mindre än i experiment 1 och 2.

Målet med studien var att undersöka om en identisk puls tillsatt i alla kolonner samtidigt, skulle generera en respons (ett svar) som enbart berodde på djupet av zon och skillnaden p.g.a. av lagret med IOCO-sanden som lagts in i K5 och K6.

Kultiveringen och analysen av vattenprov av somatisk bakteriofag ΦX174 och bakteriofag MS-2 utfördes enligt ISO-metoderna 10705-2 "Detection of an enumeration of somatic coliphages" (International Organization for Standardization 2002a) och ISO 10705-1 "Detection and enumeration of f-specific RNA bacteriophages" (International Organization for Standardization 2002b).

8.3 Studerade mikroorganismer

Metoder för att analysera fekala virus är komplicerade och dyra. Därför använder sig den tillämpade forskningen av bakteriofager i studier kring virusavskiljning. Bakteriofager (eller bara fager) är virus som infekterar bakterier som värdar. Fager har visat sig vara tämligen dåliga på att indikera fekal påverkan p.g.a. dålig korrelation mellan fekal förorening och närvaron av fager, och därför används

de ej som indikatororganism i någon större omfattning (Leclerc *et al.* 2000). Däremot har de egenskaper som gör dem lämpliga för studier av retention och inaktivering. Liksom sjukdomsframkallande virus är de själva virus, har samma storlek, har samma resistens mot desinfektion och, vilket är viktigt för studier i grundvatten, de tycks bete sig likadant under transporten i marken.

MS-2 är en F⁺-specifik bakteriofag med en storlek på 20-30 nm och är en s.k. FRNA-kolifag. Studier har visat att bakteriofagen MS-2 har en låg inaktiveringshastighet och har en lägre hastighet än virus som poliovirus 1 och echovirus 1 vid samma temperatur. Hastigheten är också lägre än den som coxsackievirus och rotavirus uppvisar vid en temperatur på 3-15 °C. MS-2 fäster dåligt till markmaterial med en negativ ytladdning och uppvisar knappt någon sorption vid pH 6-8 i vattenmättad media med en låg halt organiskt material. Jämfört med andra virus, är fastläggningen av MS-2 låg i de flesta porösa media. Just därför att MS-2 har så låg affinitet och samma storlek som fekal virus, är den en god simuleringsorganism för studier av sjukdomsalstrande virus (Leclerc *et al.* 2000). Bakteriofagen ΦX174 användes för att undersöka ett spann av virusreduktion. Den har en högre iso-elektrisk punkt än MS-2 vilket ger den annorlunda sorptionsegenskaper.

8.4 Beräkning av reduktionen

Beräkningen av reduktionen i omättad zon utgick från skillnaden mellan de maximala koncentrationerna i responskurvan för varje kolonn i ett experiment, och inte utifrån skillnaden mellan initial koncentration i pulsen och maximal koncentration i responsen för en specifik kolonn. I experimentet fick alla kolonner samma ingående tillsattpuls. Detta innebär i sin tur att en eventuell variation i tillsatsen blev mindre kritisk i analysen eftersom varje enskild kolonnrespons var en respons på samma variation.

Reduktionen analyserades genom att log₁₀-reduktionen beräknades för varje kolonn, vilket gav reduktionen för varje studerat fall:

$$\log\text{-reduktion} = \log_{10} (C_{\max}/C_0) \quad [\text{Ekv8-1}]$$

där $C_{\max}/C_0$ är maxkoncentration i responskurvan dividerad med initial pulskoncentration C_0 . Eftersom pulskoncentrationen varierade och var svår att hålla konstant, beroende på inaktivering och inblandningen i råvattnet, användes i denna studie maximum-koncentrationen då den bedöms ha utsatt kolonnerna för den högsta organismbelastningen (Tabell 8-2). Filterfaktorn beräknas ur uttrycket:

$$\log_{10} (C_{\max}/C_0) = C_f \times \text{Längden} + \text{Konstant} \quad [\text{Ekv8-2}]$$

där lutningen C_f är den okorrigerade filterkonstanten i ett semilogaritmiskt diagram, med enheten log₁₀/m eller log₁₀/h, beroende på den parameter man undersöker.

Därefter måste konstanten korrigeras för dispersionen i kolonnen. Ett spårämne som tillsätts ett vatten blandas ut i vattnet p.g.a. till exempel diffusion (molekylär påverkan) och advektion (flödespåverkan). Dessa mekanismer kan samlas under begreppet dispersion. Att ett ämne utsätts för dispersion innebär att koncentrationen blir lägre men mer ihållande i utgående vatten från en process. Denna effekt har inget med reduceringen av ämnet i sandmaterialet att göra men påverkar ändå den utgående koncentrationspulsen genom en sänkning av den maximala koncentrationen. Vidare ökar effekten av dispersionen ju längre i sandmaterialet ämnet är transporterat.

I denna studie har antagandet gjorts att dispersionen beter sig ungefär som reduktionen och att effekten kan uttryckas som ett linjärt samband i ett semilogaritmiskt diagram enligt samma princip som för reduktionen. Spårämneshörsök med natriumklorid utfördes i alla kolonner och en log₁₀ reduktion beräknades med Ekv8-1. Därefter beräknades dispersionskonstanten C_d :

$$\log_{10} (C_{\max}/C_0) = C_d \times \text{Längden} + \text{Konstant} \quad [\text{Ekv8-3}]$$

Den verkliga filterkonstanten beräknades sedan som:

$$F = C_f - C_d. \quad [\text{Ekv8-4}]$$

8.5 Avvikelser i vattenkvalitet under tillsatsexperimenten

Under tillsatsexperimenten ökade salthalten och koncentrationen av organiskt material markant (Tabell 8-1). För experiment 3 innebar det att blandningen bestod av en lösning med odlade bakteriofager blandad i råvatten i förhållandet 1:200.

Vattnets pH sjönk markant i utgående vatten (filtrat) under experimenten. I experiment 3 sjönk pH strax under 6. Efter experimenten skedde en återhämtning upp mot 7. Det var höga halter av organiskt material i experimenten (Tabell 8-1). Kvoten UV_{254}/TOC tydde på att andelen organiska föreningar med humuskaraktär var liten i förhållande till Delsjöarnas vatten och indikerade att det organiska materialet i tillsatserna skilde sig ordentligt från NOM i västsvenskt sjövattnet. I råvatten från Delsjöarna låg den på ca 3 medan den låg på 0,3-0,8 för tillsatsen.

8.6 Resultat och diskussion

Responskurvan för experiment 1 och 2 (Figur 8-1 och 8-2) tydde på en reduktion av fagkoncentrationen för alla kolonner, observerad som skillnaden mellan tillsatskoncentration och maximal pulskoncentration. Den högsta reduktionen noterades för den djupaste omättade zonen i Gråbomaterial (4 m; K1). I experiment 1 upphörde den mättade kolonnen att fungera (K0) p.g.a. igensättningar, vilket åtgärdades inför experiment 2. I experiment 2 visade 2 m mättad zon en liknade reduktion som för 1 m och 2 m av omättad zon men den gav en sämre reduktion

än 4 m omättad zon. Det märktes således ingen direkt skillnad på 2 m material, oavsett mättnad.

Reduktionen i 4 m omättad zon i experiment 2 visade på en sämre reduktion än i experiment 1, vilket möjligen kan ha berott på den högre jonstyrkan och/eller den högre halten av organiskt material i experiment 2. Experiment 1 och 2 genomfördes möjligen för rätt inpå varandra (några månader skilde dem åt) för att kolonnerna ska ha hunnit återhämta sig (med antagandet att det sker en återhämtning) efter experiment 1. Tester (redovisas ej) visade att det fanns effekter kopplade till tillsatslösningen. När en lösning utan fager tillsattes men med den näringssubstans som används vid odlingen av fager, visade det sig att halten fager ökade i utgående vatten. Men om det berodde på den ökade halten organiskt material, den ökade salthalten eller den kombinerade effekten av dem båda, gick inte att uttyda från försöket.

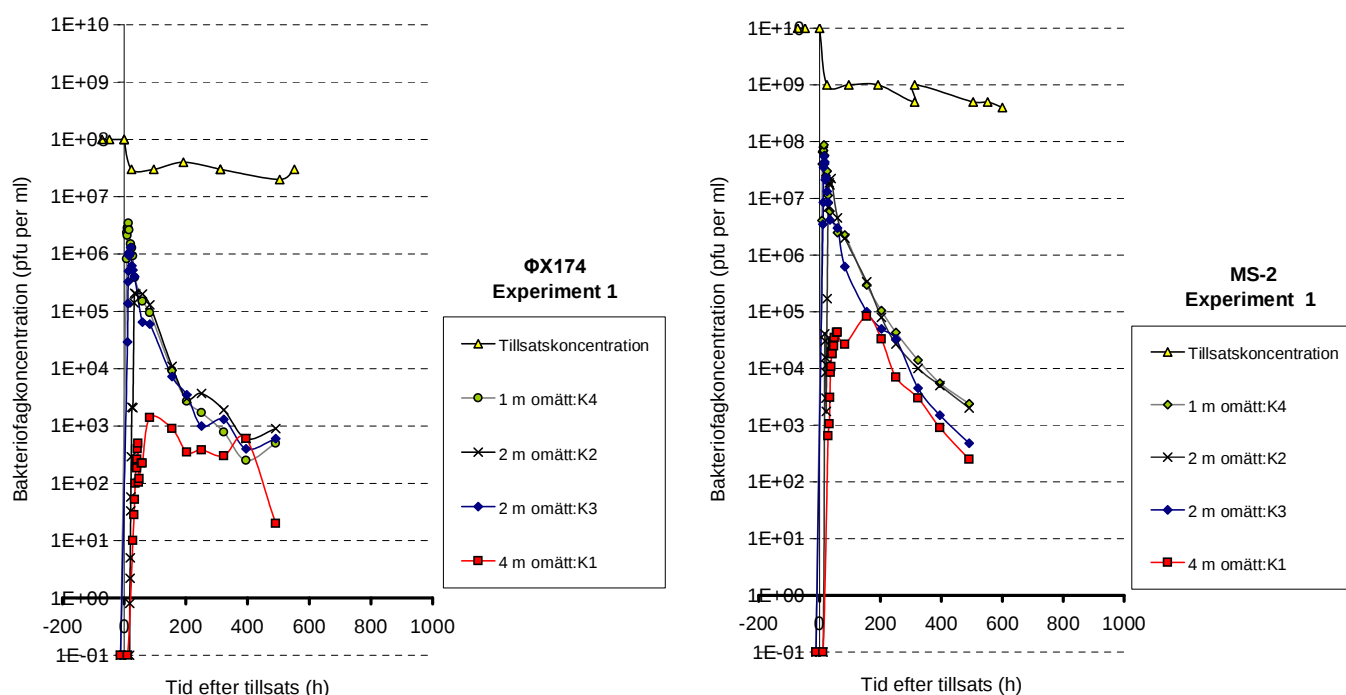
Pulskoncentrationen blev olika för de olika experimenten, beroende på inaktivering av fager och utblandningsförfarande, och den varierade även i tiden beroende på inaktivering (Figur 8-1 och 8-2). Kurvan som visar koncentrationen i tillsatsen var resultatet av provtagningen för kontroll av inaktivering i tillsatslösningen och omfattar en längre tid än pulsens tillsattstid.

Maximal koncentration som användes vid beräkningarna av filterkonstanten redovisas i tabell 8-2, nedan. Resultatet från experiment 3 jämfördes med resultaten i experiment 1 och 2 med samma beräkningsmodell som ovan beskrivits. Istället för maximal koncentrationen användes dock en period med konstanta reduktionsförhållanden ("steady state") under 2005-05-26—31.

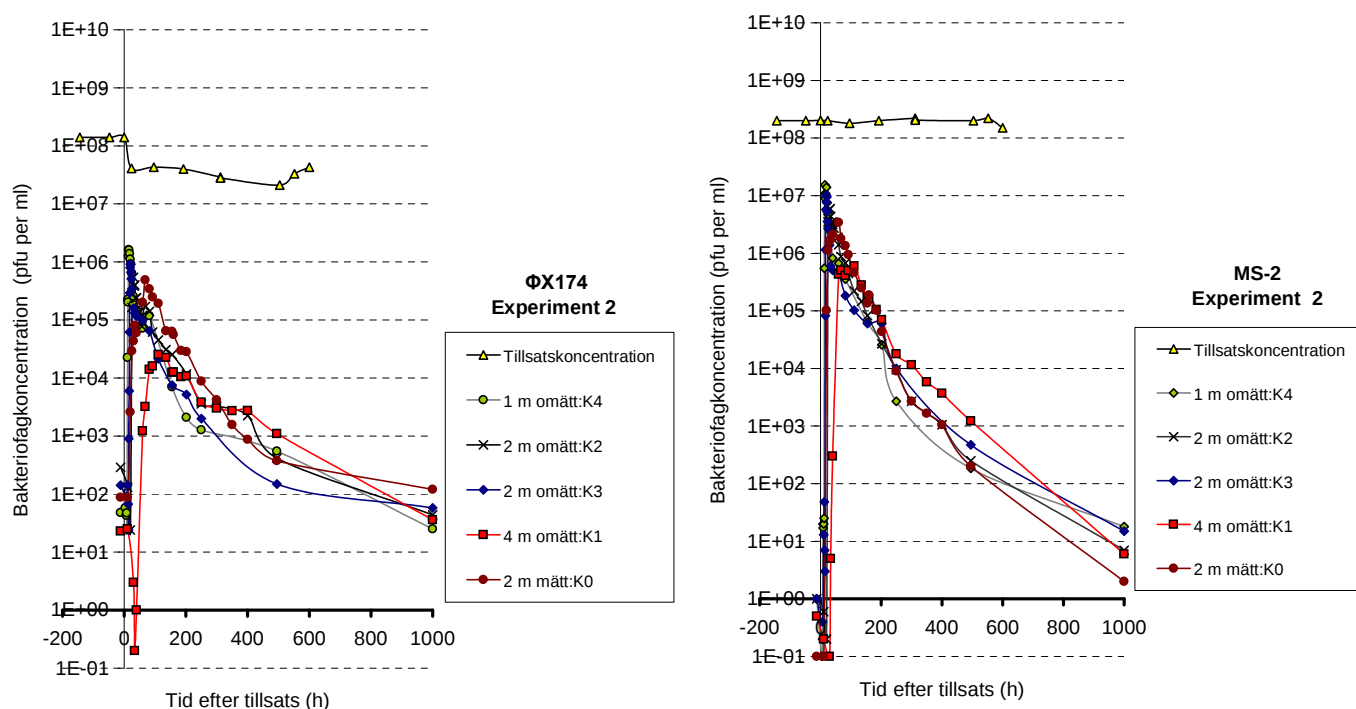
Experiment 3 visade på distinkta skillnader i fagkoncentration i utgående vatten från kolonnerna (Figur 8-3, nedan). Resultatet visade också tydligt att 2 m mättad zon gav den högsta utgående

Tabell 8-1. Tillsatskaraktäristika (med enstaka värden).

Analys	Enhet	Tillsatsförsök 1	Tillsatsförsök 2	Tillsatsförsök 3
COD_{Mn}	mg /l	2900	3400	15
TOC	mg/l			20
UV 254nm	ae/cm	1,78	8,9	0,15
pH		6,9	7	6,8
Elektrisk Konduktivitet	mS/m	1348	5500	36
COD_{Mn}/TOC				0,8
UV_{254}/TOC	l/(mg x m)	0,6	0,3	0,8



Figur 8-1. Responskurvor för bakteriofager Φ X174 och MS-2 i pulsresponsexperiment 1. Pulsen tillsattes under 40 min.

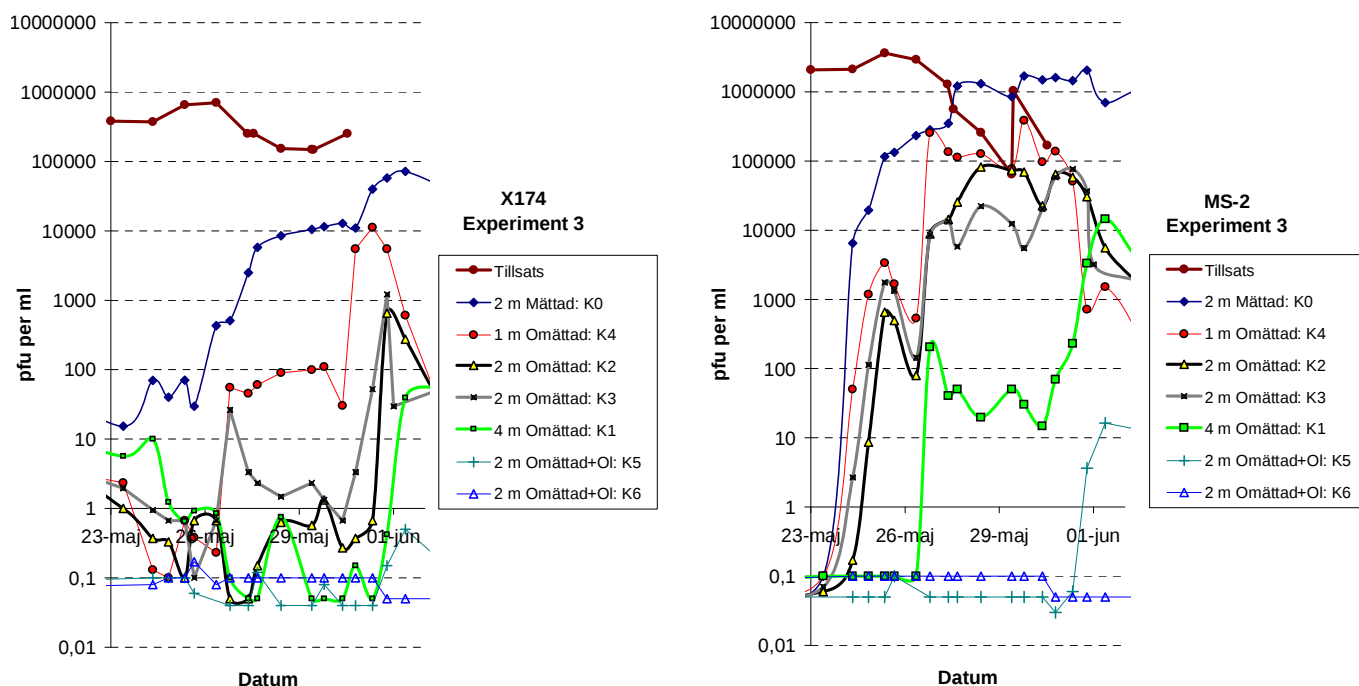


Figur 8-2. Responskurvor för bakteriofager Φ X174 och MS-2 i pulsresponsexperiment 2. Pulsen tillsattes under 40 min.

koncentrationen; upp till 1-4 $\log_{10}$ högre än de jämförda fallen med 2 m omättad zon. Resultatet visade att reduktionen ökade med djupet på omättad zon, där 1 m omättad zon hade den högsta koncentrationen ut medan 4 meter omättad zon hade den lägre. De utlästa koncentrationerna för perioden med konstant reduktionstillstånd redovisas i tabell 8-2

och beräkningsresultatet av filterkonstanten finns i tabell 8-3, nedan.

Medelreduktionen, uttryckt som filterkonstanten, beräknades i studien till $0,73 \pm 0,4 \log_{10}/m$. Reduktions-effektiviteten, visad som lutningen i figur 8-4 (nedan), var högre i experiment 1 ($0,90-0,99 \log_{10}/m$) än i experiment 2 ($0,32-0,46 \log_{10}/m$). Det kan bero på



Figur 8-3. Tillsatsexperiment 3 med bakteriofager MS-2 och Φ X174 i experiment 3 med syfte att uppnå konstant reduktionstillstånd. Pulsen tillsattes under 7 dagar.

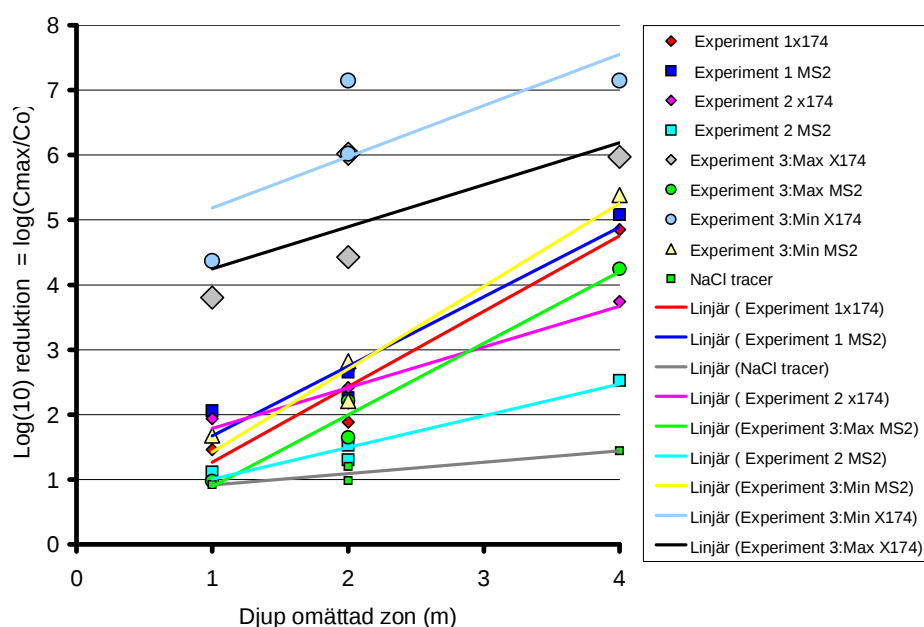
Tabell 8-2. Högsta koncentration i experiment 1 och 2 och vid konstant tillstånd i experiment 3. Avrundat till två värdesiffror. För experiment 1 och 2 avser max och min maximum och minimum beroende på inaktivering i tillsatslösningen, d.v.s. även efter att tillsatsen avslutats. För experiment 3 avser min och max observerade maximum och minimum i tillsatsen under tillsättningen. Bedömningen av konstant tillstånd gjordes för perioden 2005-05-26—31.

Kon- centration i pfu/ml	Djup (m)	HRT t(50 %) (h)	Experiment 1 Φ X174	Experiment 1 MS-2	Experiment 2 Φ X174	Experiment 2 MS-2	Experiment 3: Max Φ X174	Experiment 3: Min Φ X174	Experiment 3: Max MS-2	Experiment 3: Min MS-2
PulsKonc. Max (C_0)			$1,0 \times 10^8$	$1,0 \times 10^{10}$	$1,4 \times 10^8$	$2,0 \times 10^8$	$7,0 \times 10^5$	$7,0 \times 10^5$	$3,6 \times 10^6$	$3,6 \times 10^6$
PulsKonc. Min			$3,0 \times 10^7$	$1,0 \times 10^9$	$2,1 \times 10^7$	$1,5 \times 10^8$	$1,5 \times 10^5$	$1,5 \times 10^5$	$6,4 \times 10^4$	$6,4 \times 10^4$
K1: 4 m omättad zon	4	44	$1,4 \times 10^3$	$8,3 \times 10^4$	$2,5 \times 10^4$	$6,0 \times 10^5$	0,75	0,05	$2,1 \times 10^2$	15
K2: 2 m omättad zon	2	24	$2,1 \times 10^5$	$2,2 \times 10^7$	$5,4 \times 10^5$	$6,0 \times 10^6$	0,67	0,05	$8,2 \times 10^4$	$2,3 \times 10^4$
K3: 2 m omättad zon	2	20	$1,3 \times 10^6$	$5,5 \times 10^7$	$9,2 \times 10^5$	$1,0 \times 10^7$	26,0	0,67	$2,2 \times 10^4$	$5,5 \times 10^3$
K4: 1 m omättad zon	1	13	$3,4 \times 10^6$	$8,7 \times 10^7$	$1,6 \times 10^6$	$1,5 \times 10^7$	$1,1 \times 10^2$	30	$3,9 \times 10^5$	$7,7 \times 10^4$
K0: 2 m mättad zon	2	39	Failed*	Failed*	$4,9 \times 10^5$	$3,4 \times 10^6$	$1,3 \times 10^4$	$5,8 \times 10^3$	$1,7 \times 10^6$	$8,5 \times 10^5$

* K0 satte igen och gick inte att utvärdera.

Tabell 8-3. Samband (regressionsanalys) baserad på $\log_{10}$ -reduktionen för varje kolonn och bakteriofag.

Experiment (Färg i Figur 8-4)	Experiment Typ	y $\log_{10}(C_{\max}/C_0)$	R ²	C _f $\log_{10}/m$	F = C _f ·C _d $\log_{10}/m$
1 MS-2 (Blå)	Pulsrespons	1,0717x + 0,602	0,93	1,07	0,90
1 ΦX174 (Röd)	Pulsrespons	1,163x + 0,1045	0,94	1,16	0,99
2 MS-2 (Turkos)	Pulsrespons	0,4872x + 0,5197	0,96	0,49	0,32
2 ΦX174 (Lila)	Pulsrespons	0,6275x + 1,1571	0,96	0,63	0,46
3:1 MS-2 (Grön)	Konstant tillstånd	1,1056x - 0,217	0,97	1,11	0,94
3:2 MS-2 (Gul)	Konstant tillstånd	1,2781x + 0,1458	0,96	1,28	1,11
3:1 ΦX174 (Svart)	Konstant tillstånd	0,6488x + 3,5953	0,54	0,65	0,48
3:2 ΦX174 (Ljusblå)	Konstant tillstånd	0,7904x + 4,392	0,57	0,79	0,62
					Filter Faktor F $\log_{10}/m$
					min medel max
Dispersion exper.		y ($\log_{10}(C_{\max}/C_0)$)	R2	C _d ($\log_{10}/m$)	
NaCl (Grey)	Pulsrespons	0,1749x + 0,7426	0,85	0,17	0,32 0,73 1,11



Figur 8-4. $\log_{10}$ -reduktion som ett förhållande till djup av omättad zon i meter. C_0 är maximal pulskoncentration.

innehållet av organiskt material och virus i föregående experiment, vilka kan ha ockuperat fastläggningsplatser i sanden och på så vis hindrat tillsatsens fager från att läggas fast till kornen. I både experiment 1 och 2 var reduktionsfaktorn hos MS-2 lägre än för ΦX174.

Filterfaktorn var, omvänt från experiment 1 och 2, lägre för ΦX174 (0,48–0,62 $\log_{10}/m$) än för MS-2 (0,94–1,11 $\log_{10}/m$) i experiment 3 även om den totala reduktionen tycks ha varit högre för ΦX174 (ca 4–7 $\log_{10}$) jämfört med MS-2 (ca 1–5 $\log_{10}$). Filterfaktorn var baserad på reduktionen mellan 1 och 4 m, vilket kan betyda att ΦX174 mer effektivt reducerades i den första metern och därefter mindre

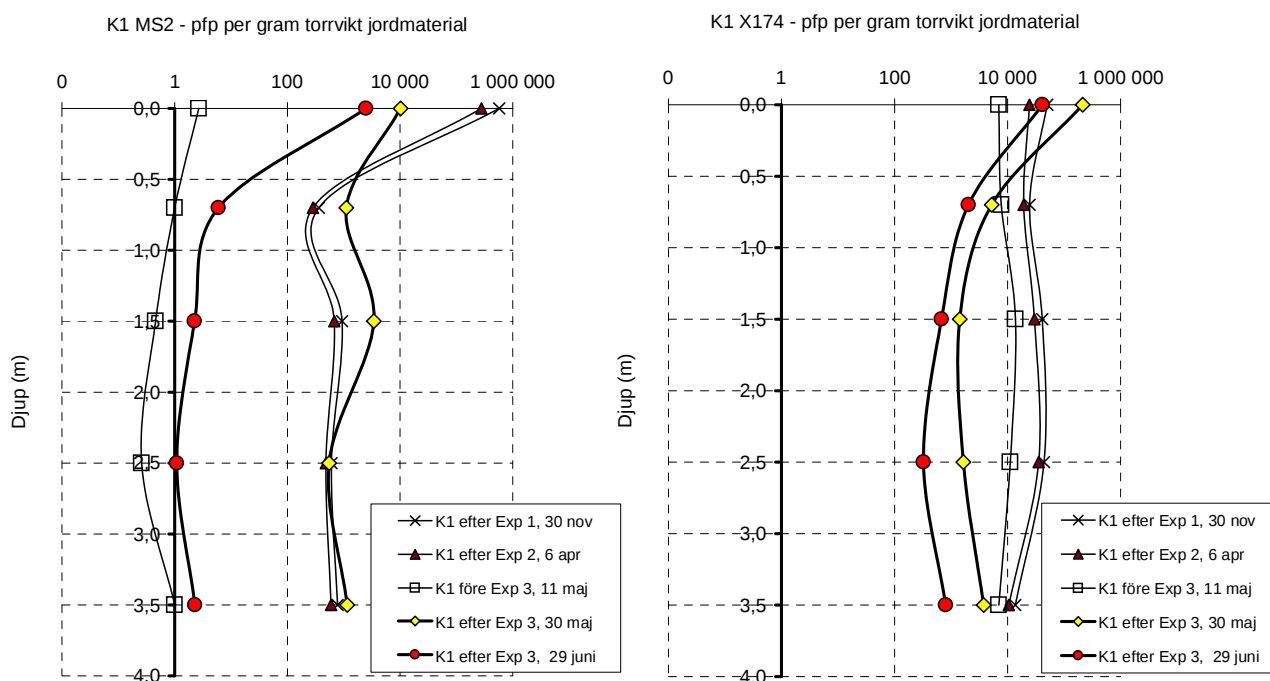
effektivt. MS-2 däremot uppvisade inte samma initiala reduktion i första metern utan hade en mer jämn reduktionshastighet över de undersökta zondjupen. Denna effekt var inte lika tydlig i experiment 1 och 2 som i experiment 3, när tillsatskoncentrationen av fager, organiskt material och salt var mycket lägre.

Gråbomaterial med IOCO-sand uppvisade en högre reduktion av bägge studerade bakteriofager. I figur 8-3 noteras att $\log_{10}$ -reduktionen, utifrån en grafisk analys, låg på 5–6 för ΦX174 och 4–5 för MS-2. I jämförelse med studien av omättad zon hade IOCO-kolonnerna en klart bättre reduktion, där möjligen 4 m omättad zon låg i närheten av effektivitet.

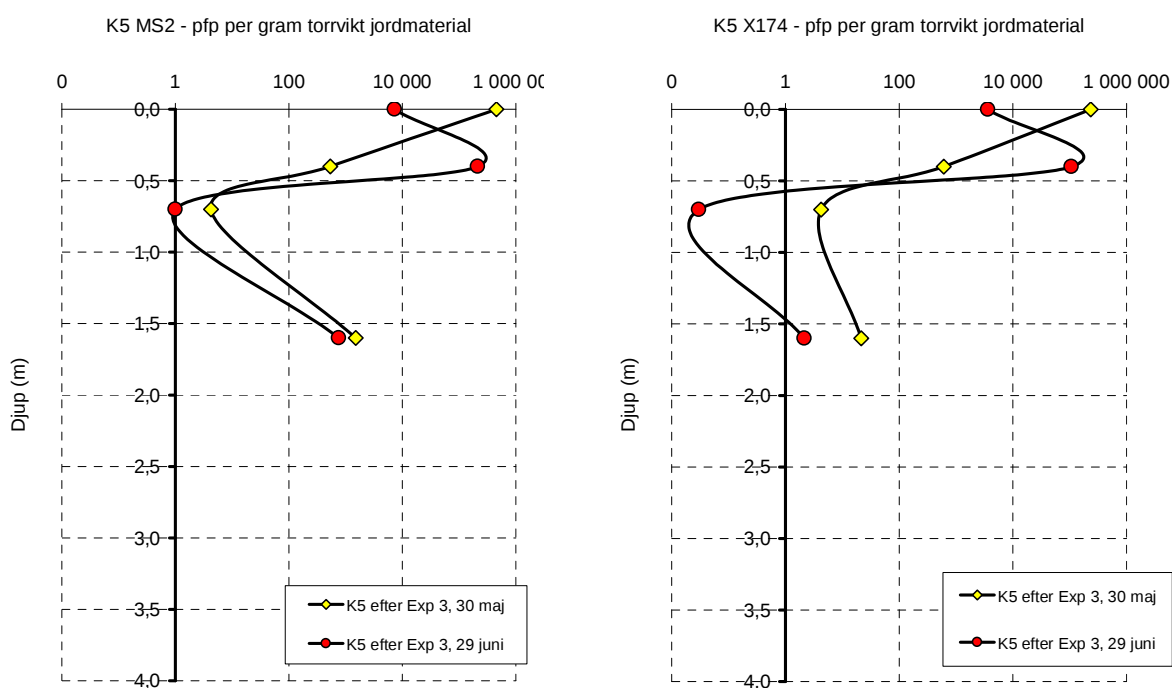
8.7 Avskiljningens lokalisering i kolonnen

Experiment 1 och 2 genomfördes före experiment 3 och på vinterhalvåret. Experiment 3 genomfördes strax före sommaren. För MS-2 tycks det ha uppstått

en tidig kraftig reduktion vid ytan efter experiment 1 och 2. Profilerna för experiment 1 och 2 är i princip identiska för bägge fager, både i variation och i koncentration. För Φ X174 tycks reduktionen varit jämnt fördelad över djupet av kolonnen. Fler Φ X174 än MS-2 återfanns också generellt i hela kolonnen.



Figur 8-5. Profil av uppmätt bakteriofager i K1: 4 meter omättad zon.



Figur 8-6. Profil av upptäckta bakteriofager i K6; 2 meter omättad zon med 0,3 m IOCO-sand.

8.8 Slutsatser

Undersökningen visar att omättad zon i Gråbosand hade en barriärkapacitet på ca $0,73 \pm 0,4 \log_{10}/m$. Det skulle i så fall svara mot ca $1,5 \log_{10}$ för 2 m och ca $3 \log_{10}$ för 4 m omättad zon. Sannolikt var reduktionen högre initialt med tanke på att det finns goda indikationer på en kraftig reduktion (ca $1-4 \log_{10}$) redan under den första metern, vilket inte återspeglades i filterfaktorn som beräknats med resultat från 1 till 4 m omättad zon. 4 meter omättad zon korresponderade till ca 44 h i uppehållstid i undersökningen.

Järnoxidträckt olivinsand bidrog positivt till den mikrobiologiska barriärverkan genom att öka reduktionseffektiviteten i omättad zon. Resultatet visade att IOCO-sanden ökade signifikant reduktionen av bakteriofager. Reduktionen låg på $5-6 \log_{10}$ för $\Phi X174$ och $4-5 \log_{10}$ för MS-2.

Flest bakteriofager avskiljdes troligen på och i ytan av sanden men återfanns ner till ca 3,5 m i kolonnerna.

Förändrad vattenkvalitet, t.ex. med avseende på jonstyrka och halt av organiskt material, tycks ha påverka bakteriofagerna till att släppa från materialet.

Sammantaget visade studien att den mikrobiologiska barriärverkan, med avseende på virus, var god i en omättad zon om 4 m ($3 \log_{10}$) och var bättre än klordesinfektion ($2 \log_{10}$) och lika bra som kemisk fällning med filtrering ($3-4 \log_{10}$ för bakterier och virus). Omättad zon tycks ha varit effektivare än mättad. Resultatet visade att järnoxidträckt olivinsand kraftigt förstärkte virusreduktionen i omättad zon och med fördel kan användas i syfte att förstärka den mikrobiologiska barriärverkan i tunnare mäktigheter med omättad zon.

9 Reduktion av bakterier

9.1 Introduktion

Ett antal studier genomfördes för att få en uppfattning om barriäreffektiviteten med avseende på bakterier:

- Provresultatet analyserades från perioder då kolonnerna fick råvatten från Delsjöarna
 - Indikatorbakterier
 - Fluorescerande naturliga partiklar
- Ett tillsatsexperiment med avloppsvatten genomfördes för att utmana Gråbomaterialet med avseende på bakterier
 - Indikatorbakterier
 - Fluorescerande konstgjorda partiklar

9.2 Metod

9.2.1 Allmänt

Koliforma bakterier, *E.coli*, Enterokocker och *Cl. perfringens* valdes som modellorganismer i studien. *Cl. perfringens* var speciellt intressant eftersom den är sporbildande och har en tålighet motsvarande en parasit men en storlek som en bakterie. Den utgjorde således ett sämsta-fallet-scenario. Streptokocker är också tåligare än *E.coli*. Därutöver har tillsatsexperiment genomförts med hydrofila fluorescerande konstgjorda partiklar med en storlek på 1 mikrometer för att simulera bakterier och protozoer. Metoder för de mikrobiologiska analysmetoderna redovisas i tabell 9-1.

Tabell 9-1. Använda mikrobiologiska analysmetoder under experiment 4.

Analys	Detektionsgräns	Metod
Koliforma bakterier 35 °C MPN	<1 Ant/100 ml	Colilert18 (Manufacturer: IDEXX)
<i>E.coli</i> 35 °C MPN	<1 Ant/100 ml	Colilert 18 (Manufacturer: IDEXX)
Koliforma bakterier 35 °C MF	<1CFU/100 ml	SS 0281672
<i>E.coli</i> 44 °C MF	<1 CFU/100 ml	SS 0281672 mod
Enterokocker 35 °C MF	<1 CFU/100 ml	SS EN ISO 78992 utg 1
<i>Cl.perfringens</i> (pres) MF	<1 CFU/100 ml	ISO/CD 64612 021220

9.2.2 Råvatten från Delsjöarna

Då det var få genombrott av de studerade bakterierna i filtratet från kolonnerna, studerades reduktionen genom att beräkna medel, min och max av provanalyser för råvatten och filtrat från kolonnerna. Genom att sätta upp medelvärden av analysen i stapeldiagram kunde jämförelser göras för de olika kolonnerna.

Alger är till sin storlek lika bakterier, vilket kan ge ytterligare information om bakteriers beteende. Alger som är naturligt fluorescerande, mättes med flödescytometri i två olika storleksintervall, 0,4–1 µm och 1–15 µm.

9.2.3 Tillsatsexperiment 4

Experiment 4 genomfördes som en tillsatsundersökning med en puls som tillsattes under 12 dagar för att uppnå ett konstant reduktionstillstånd (s.k. "steady state"). Experimentet genomfördes 2005-09-14 till 2005-09-29 med försedimenterat avloppsvatten från Ryaverket i Göteborg. Avloppsvatten hämtades vid tre tillfällen för att uppnå en så konstant koncentration som möjligt. Bakterier kan dö av relativt snabbt och tillsatsvatten blandades därför nytt varje dag under tillsatsen. För att få en tillräckligt hög koncentration av bakterier samt för att överstiga koncentrationerna vid höga nivåer i Göta älv men samtidigt inte skapa problem med igensättningar p.g.a. det näringsrika avloppsvattnet, bestämdes en utspädning av avloppsvattnet i råvattnet till 2 %.

För tillsatsexperiment 4 beräknades en $\log_{10}$ -reduktion genom en jämförelse av den högsta koncentrationen av de fåtal genombrott som detekterades för en modellorganism i kolonnerna $C_{\max, \text{kolonn}}$ med både minimum $C_{\max, \text{tillsats}}$ och maximum $C_{\max, \text{tillsats}}$ av koncentrationen i tillsatsen. För värden <1 cfu eller ant/ml sattes 0 cfu eller ant/ml:

$$\text{minreduktion} = \log(C_{\max, \text{kolonn}}/C_{\min, \text{tillsats}}) \text{ [Ekv 9-1]}$$

$$\text{maxreduktion} = \log(C_{\max, \text{kolonn}}/C_{\max, \text{tillsats}}) \text{ [Ekv 9-2]}$$

De fluorescerande konstgjorda partiklarna är gjorda av plast och analyserades med flödescytometri i partikelstorleksspannet 0,4–1 µm samt i spannet 1–15 µm. Partiklarna är hydrofila för att motsvara

en svåravskiljbar partikel som har större affinitet¹³ till vatten än till sanden. Partiklarna tillsattes samtidigt som tillsatsexperimentet med avlopp, till en halt av $1,8 \times 10^4$ st/ml i tillsatsen.

9.3 Råvatten från delsjöarna

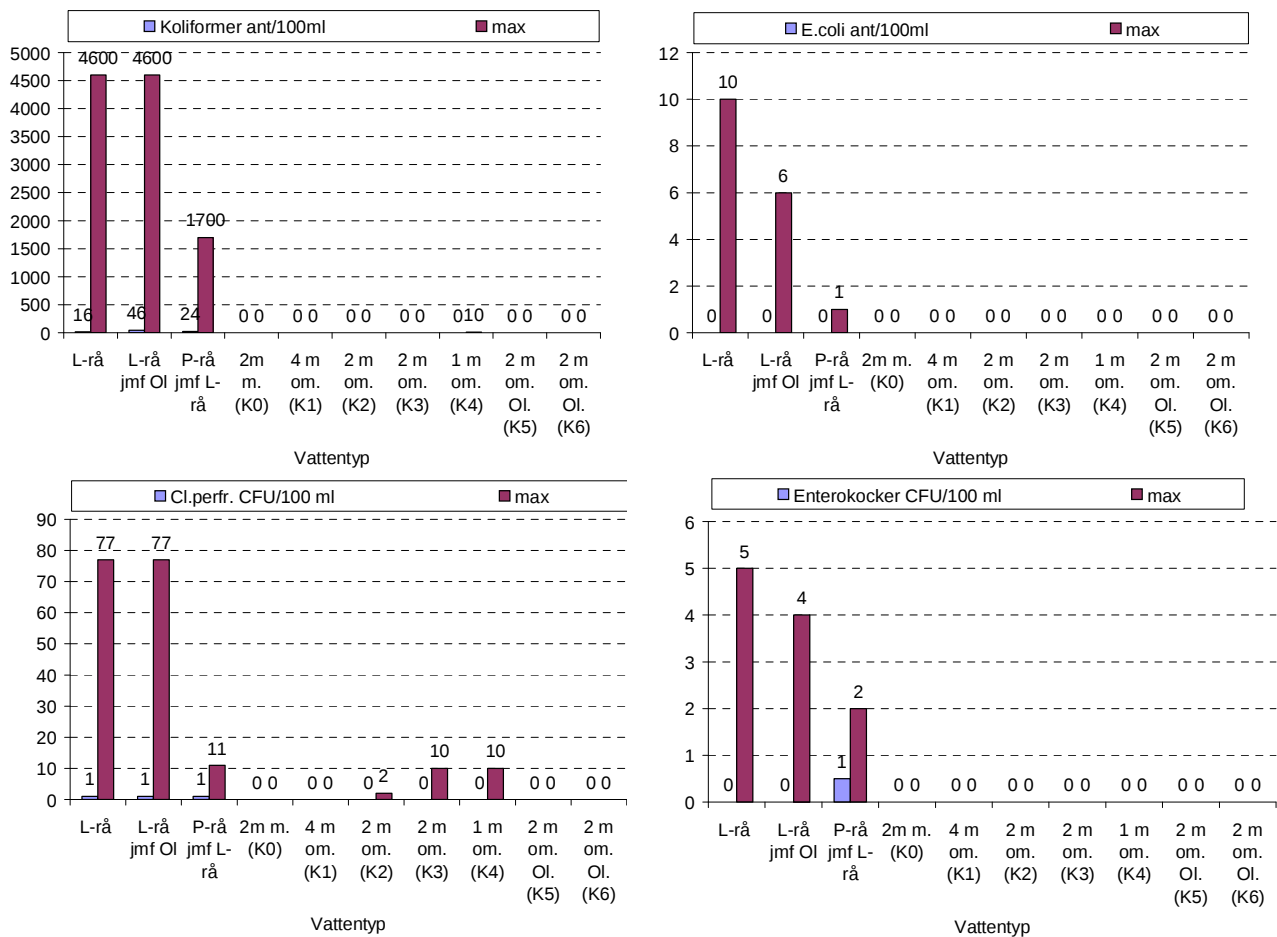
Halten koliforma bakterier i råvattnet varierade med årstiden, med höga halter under sensommar och höst och med lägre värden på våren. Den högsta uppmätta halten var 1700 ant/100 ml (mätt med Colilert) i råvattnet till pilotanläggningen, och den lägsta var 2. Halten *E.coli* var låg; <1 i alla prov utom ett, där halten var 2 ant/100 ml. Lackarebäcks råvatten mättes vid fler tillfällen och visade värden mellan <1 och 6 cfu/100 ml. Även halten fekala streptokocker var låg; mellan <1 och 3 cfu/100 ml i råvatten i pilotanläggningen, och mellan <1 och 4 CFU/100 ml i Lackarebäcks råvatten under försöksperioden. Halten *Cl.perfringens* låg mellan <1 och 11 cfu/100 ml i pilotanläggningen, och mellan <1 och 77 cfu/100 ml i Lackarebäcks råvatten. Pilotråvattnet jämfördes med Lackarebäcks råvatten och de båda visade god överensstämmelse.

Den mikrobiologiska belastningen på råvattnet var således låg (Figur 9-1). Trots det upptäcktes koliformer vid ett tillfälle i kort omättad zon (K4). Varken *E.coli* eller Enterokocker detekterades men *Cl.perfringens* uppmättes efter 1 och 2 m av omättad zon (K2, 3 och 4). I 4 m omättad zon (K1) och i IOCO-kolonnerna detekterades inte fekala indikatorbakterier någon gång.

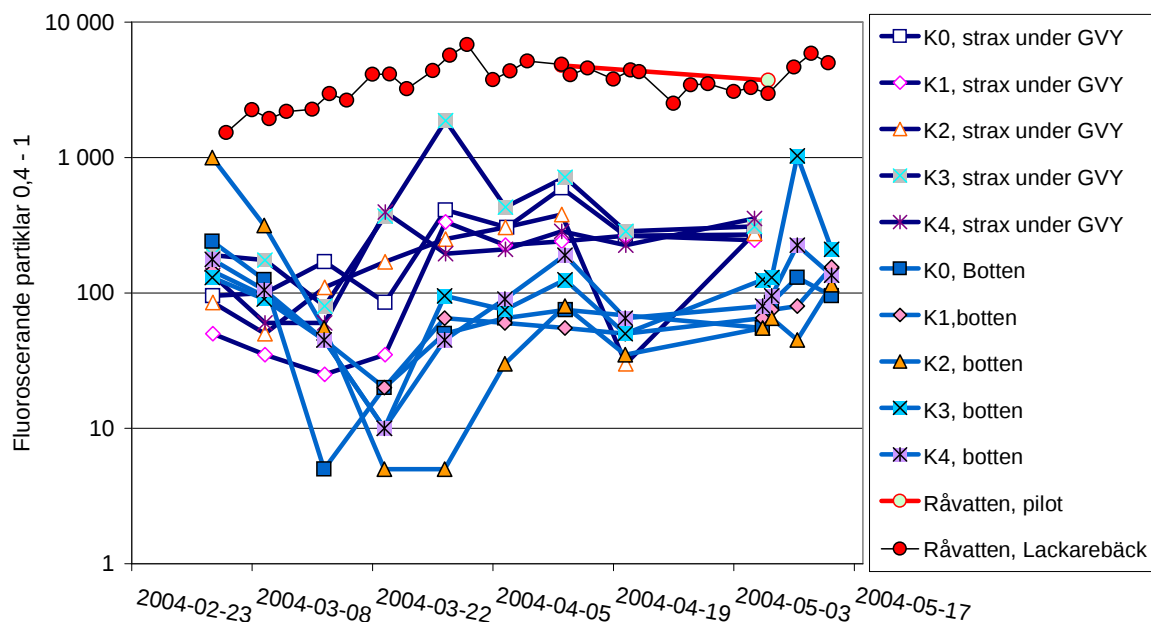
9.4 Fluorescerande naturliga partiklar

Resultatet uppvisade att det fanns en bakgrundsstrålning ifrån material som gav en referensnivå som ligger högre än i vatten som inte passerat marken. Således får man intrycket i följande diagram att ett stort antal alger passerat ut i filtrerat vatten, vilket det inte behöver betyda.

¹³ Benägenhet att dras till något.



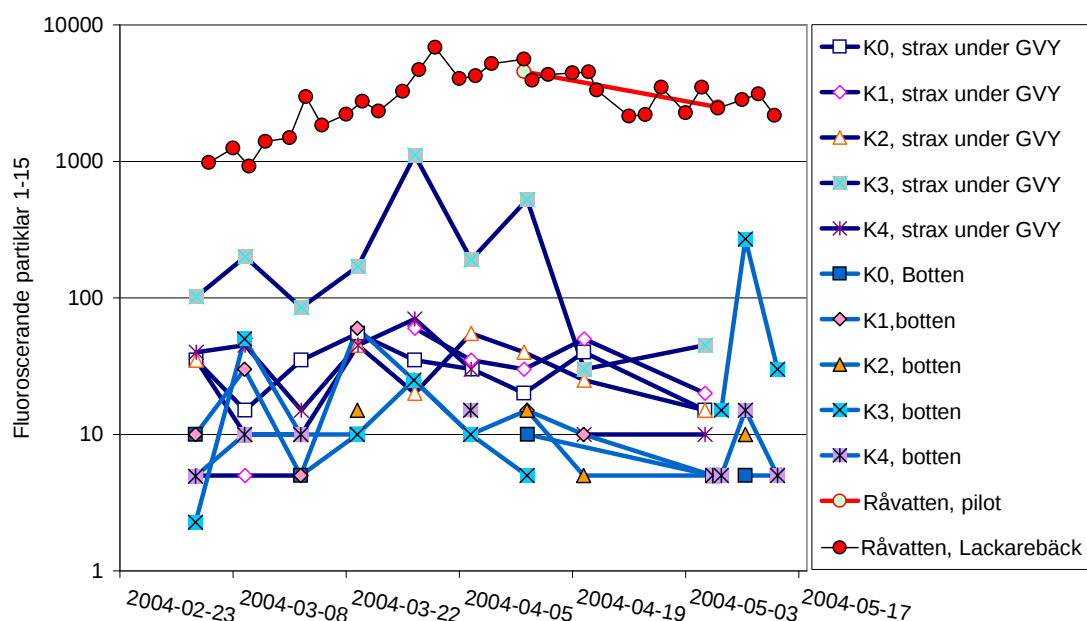
Figur 9-1. Median- och maxvärdet av bakteriella parametrar som analyserades för perioder med enbart råvatten från Delsjöarna.



Figur 9-2. Fluorescerande partiklar 0,4–1 µm råvatten och vatten från kolonn i period 1.

Under period 1, då alla kolonner hade samma konfiguration, var reduktionen av fluorescerande partiklar 0,4–1 µm ca $1 \log_{10}$ för uttaget strax under grundvattenytan och nästan $2 \log_{10}$ i bottenuttaget (Figur

6-2). För 1–15 µm låg avskiljningen runt $2 \log_{10}$ strax under grundvattenytan och lite högre i botten. Kolonn K3 utmärkte sig med en lägre reduktion än de övriga (Figur 6-3, nedan).



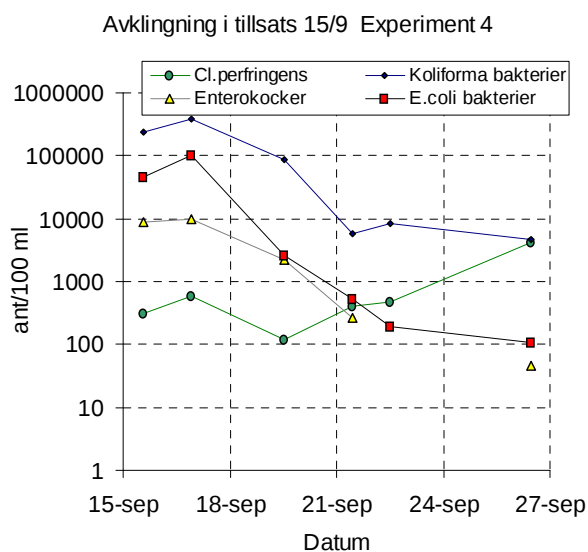
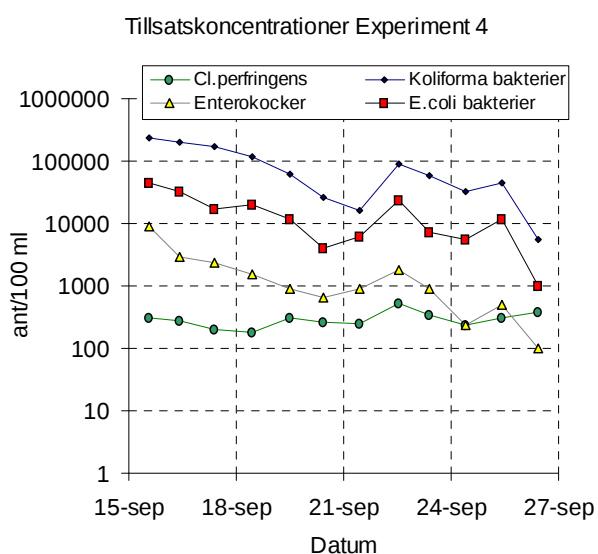
Figur 9-3. Fluorescerande partiklar 1–15 µm i råvatten och vatten från kolonn i period 1.

I början av period 2 var reduktionen av fluorescerande partiklar ungefär som under period 1, men efter ca 3 månader uppstod en sämre reduktion. För fraktionen 0,4–1 µm var trenden tydligast och halten i utgående vatten var i flera fall högre än i råvattnet. De bägge olivinkolonnerna och stundtals den mättade kolonnen hade lägre värden. Orsaken till de ökande halterna av fluorescerande partiklar är inte tydlig men kan ha haft med en tillväxt av alger i slangar eller i kolonn att göra.

9.5 Avloppstillsats

9.5.1 Tillsats

Halten av bakterier var högre i avloppsvattnet än i det vanliga råvattnet och variationen blev stor i den färdiga råvattenblandningen som utgjorde tillsatsen under experimentet. Halten av koliforma bakterier låg mellan 5 500 och 240 000 ant/100 ml och halten *E.coli* mellan 1 000 och 46 000 ant/100 ml. Fekala streptokocker varierade mellan 100 och 9 000 CFU/100 ml, och *Cl.perfringens* mellan 180 och 520 CFU/ml.

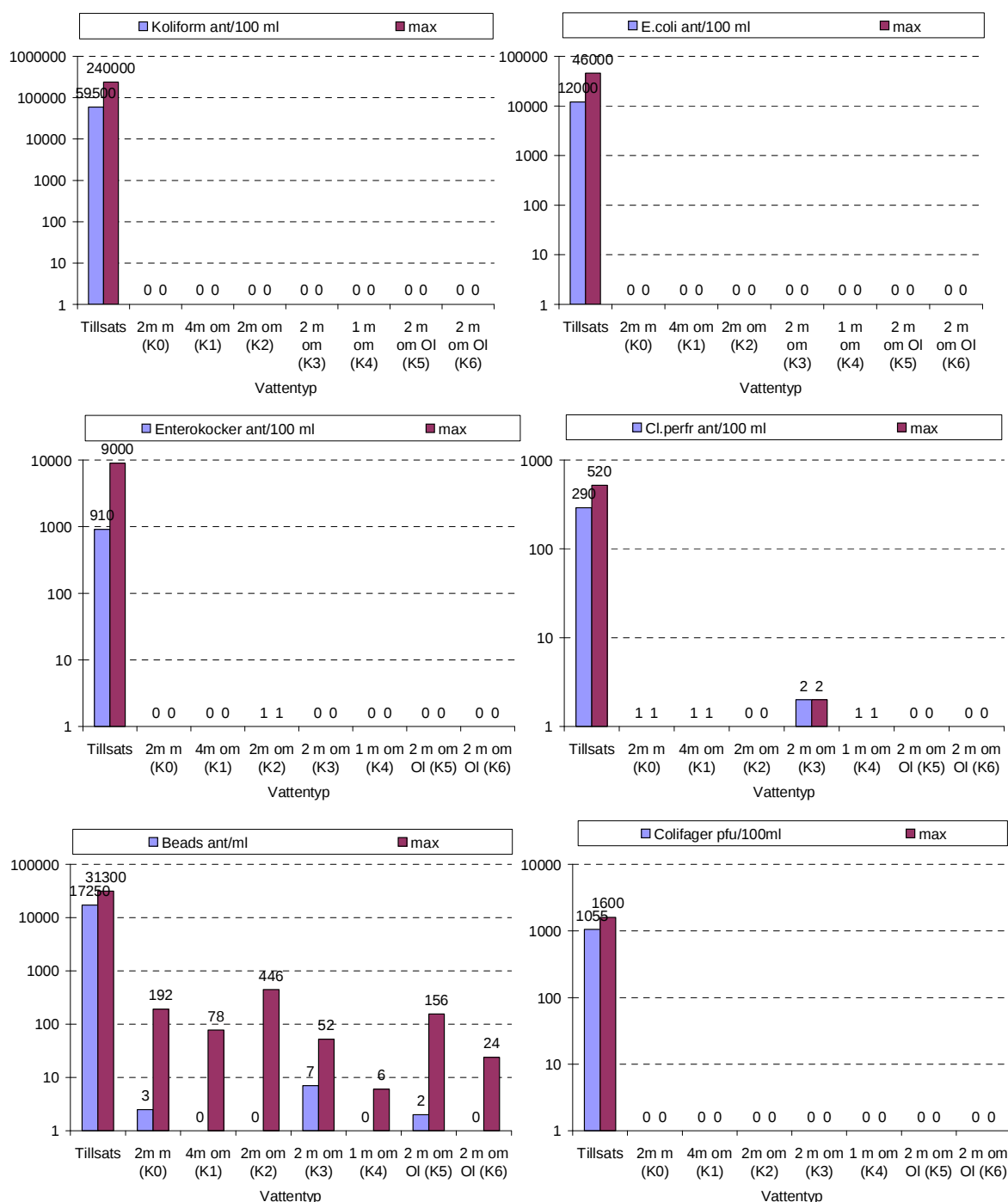


Figur 9-4. Tillsatskoncentration (vänster) och avklingning i första tillsatsblandningen (höger) i experiment 4 för reduktion av bakterier. Försöket genomfördes 2005-09-14 till 2005-09-29.

Den första tillsatsen som blandades sparades i en dunk som förvarades i samma temperatur som försökupställningen. Prov togs regelbundet för att bevaka avklingningen med tiden (Figur 9-4, ovan). Koliforma bakterier, *E.coli* och fekala streptokocker minskade kraftigt med tiden: 2 %, 0,2 % respektive 0,5 % av utgångshalt fanns kvar i prov 11 dagar senare, medan *Cl.perfringens* uppvisade en konstant nivå med en oförklarlig ökning i slutet.

9.5.2 Utgående vattenkvalitet

Resultatet (Figur 9-5) visar att varken koliforma eller *E.coli* bakterier detekterades under experiment 4. För 2 m omättad zon (K2) detekterades Enterokocker vid ett provtagningsstillfälle och ett antal detektioner av *Cl.perfringens* noterades för övriga med undantag av olivinkolonnerna som var helt fria från detektion av bakterier (och colifager). Det ska dock påpekas att



Figur 9-5. Reduktion (median- och maxvärde) av indikatorbakterier, colifager och konstgjorda fluorescerande partiklar (Beads) under experiment 4. Siffrorna i diagrammen anger detekterat antal. Beteckning m=mättad zon, om=omättad zon.

Tabell 9-2. Statistik under experiment 4 och $\log_{10}$ -reduktionen beräknad som $\text{minreduktion} = \log(C_{\text{max, kolonn}}/C_{\text{min, tillsats}})$ respektive för $\text{maxreduktion} = \log(C_{\text{max, kolonn}}/C_{\text{max, tillsats}})$.

Tillsats	Koliforma ant/100 ml	E.coli ant/100 ml	Enterokocker ant/100 ml	Cl.perfr ant/100 ml
Antal prov	12	12	12	12
$\geq$ detektionsvärde	12	12	12	12
Medel	88958	15675	1808	297
Median	59500	12000	910	290
Min	5500	1000	100	230
Max	240000	46000	9000	520
Standardavvikelse	77256	13328	2415	91
Standavvik/medel	1	1	1	0
$\log_{10}$-reduktion				
$\log_{10}$ reduktion min	–	–	–2,0	–2,1
$\log_{10}$ reduktion max	<–5,4	<–4,7	–4,0	–2,4

< indikerar att avskiljningen kan vara högre eftersom inga bakterier detekterades.

olivinkolonnerna inte varit i drift lika länge som de övriga kolonnerna och möjligen var detektionerna av Enterokocker och *Cl.perfringens* i de andra kolonnerna genombrott från tidigare belastning från Delsjöarna och ett resultat av en lång tids vandring i kolonnerna.

Hydrofila konstgjorda fluorescerande partiklar (Beads) detekterades i det utgående vattnet för flera kolonner och tillfällen, med den högsta halten på 446 st/ml, vilket innebär att avskiljningen var ca 98 %, d.v.s. nästan två tiopotenser i alla kolonner om det högsta värdet betraktas som representativt. Tidigare mätningar visade att parametern stora fluorescerande partiklar (1–15 μm) fanns i alla kolonner i låga koncentrationer och parametern små (0,4–1 μm) i höga koncentrationer, men huruvida dessa kom från inkommande råvatten, från tillväxt i de transparenta slangarna eller om det var något mineral var inte klart. I den rådande analysen betraktades resultatet från utgående vatten från kolonnerna som osäkert och det gick således inte heller att reda ut några trender kolonnerna emellan.

Kolifager är virus som angriper koliforma bakterier som värdar. Dessa mättes under experimentet men upptäcktes endast i två prov i tillsatsen; en detektion i början och en i slutet av experimentet men inga i utgående vatten från kolonnerna. Även bakterien *Campylobacter* analyserades men inga upptäcktes i varken tillsats eller utgående vatten.

9.6 Avskiljningens lokalisering i kolonnen

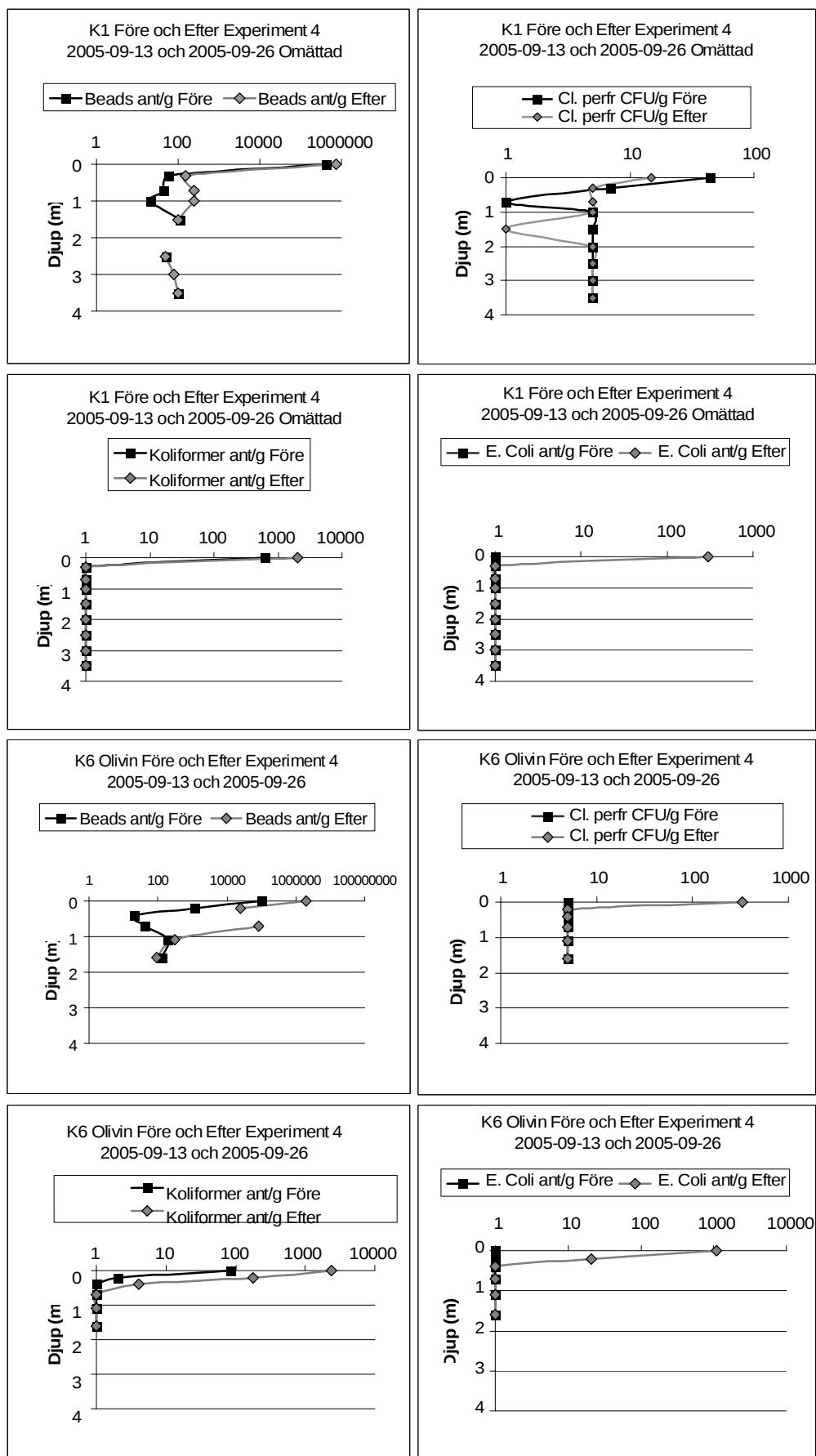
9.6.1 Allmänt

Studien syftade till att lokalisera var i kolonnen som bakterieavskiljningen sker samt hur långtgående barriärverkan är genom att avgöra om det finns en chans för bakterier att undslippa sandbädden. Analysen var baserad på grusprover som togs i samband med tillsatsundersökning 4 med avloppsvatten.

9.6.2 Metod

Grusprov för analys av Koliforma bakterier, *E.coli*, Enterokocker, *Cl.perfringens* och konstgjorda hydrofila fluorescerande partiklar (beads) togs på olika nivåer i kolonn K0, K1 och K6. Dessa representerade mättad zon, omättad zon samt ett fall med IOCO-sand. Proverna togs före och efter avloppstillsats-experimentet 2005-09-13–30; experiment 4. I den mättade kolonnen togs prov efter avslutat försök eftersom kolonnen var tvungen att tömmas på vatten innan prov kunde tas.

Gruset behandlades genom att 5 gram grus vägdes in. Därefter tillsattes 50 ml sterilt, klorfritt vatten och blandningen kördes i ultraljudsbad i någon minut. Vattnet hälldes sedan genom ett sterilt filter med



Figur 9-6. Fördelning av konstgjorda partiklar i bakteriestorlek (beads) och indikatorbakterier före och efter tillsatsförsök 4 med avloppsvatten. Mindre än detektionsvärde betraktas här som en risk för nästan detektion, d.v.s. <1 = kan vara 0,99 och är satt som 1, och <5 (det. gräns för Cl. perfr) är satt till 5.

porstorlek 70 μm och analyserades med standardmetoder (Tabell 9-1). Antal eller CFU (colony forming units) relaterades till vikten grus (per gram).

9.6.3 Resultat

Figur 9-6 (ovan) visar att före experimentet upptäcktes koliformer på ytan av kolonner med omättad zon (K1, K6) samt även ner till 0,2 m i omättad zon (K6). Mest hittades på ytan i alla kolonner. Efter experimentet fanns det fortfarande mest på ytan i alla kolonner men även 0,3–0,4 m och i omättad zon (K1, K6). *E.coli* detekterades inte i någon kolonn före experimentet men på ytan av både mättad och omättad zon (K0, K1 och K6) samt även 0,4 m i K6 efter experimentet. Enterokocker detekterades inte någonstans före experimentet men på ytan i alla kolonner samt 1,5 m ner i K1 och 0,2 m ner i K6 efter experimentet. *Cl.perfringens* detekterades före experimentet på ytan samt 0,7 m och 3,5 m ner i K1 och på ytan i K6. Efter experimentet visade analyserna att det fanns *Cl.perfringens* på ytan och 3 m ner i K1, på ytan av K6 samt på ytan och ner till 0,5 m och 1,5 m i K0.

Hydrofila fluorescerande konstgjorda partiklar (beads) upptäcktes i hela kolonnen. Metoden särskiljer inte fluorescerande alger från annat som kan fluorescera (t.ex. mineral). Bakgrundsbruset beaktad tyder resultatet på att hydrofila beads har funnits på 1 meters djup i K1 och K6. Resultatet tyder på att den mesta avskiljningen av bakterier skedde den första metern, kanske till och med den första halvmetern.

9.7 Slutsatser

Resultaten tyder på att det inte går att betrakta barriären i 4 meter med Gråbomaterial som absolut då bakterier upptäcktes i utgående vatten från alla kolonnerna utan IOCO-sand. Det är de mer tåliga bakterierna som detekterats, vilket visar att mikroorganismer i storleksordningen 1 mikrometer kan passera 4 m Gråbomaterial, om de inte dör av p.g.a. omgivande miljö. Denna slutsats stöds också av undersökningarna av var i sanden bakterierna upptäckts som visar att *Cl.perfringens* har detekterats

3,5 m ner i kolonnerna, strax före utloppet. Tyvärr var halterna bakterier av de mer tåliga organismerna; Enterokocker och *Cl.perfringens*, något för låga för att riktigt utmana kolonnerna och ge ett säkert genom-brott, men detektionerna föreslår en avskiljningen av mer tåliga bakterier kring ca $2,4 \log_{10}$ för ett djup av omättad zon på mindre än 4 meter.

Eftersom ingående halter var högre för de mindre tåliga bakterier, som inte detekterades i utgående vatten från kolonnerna, är det ganska troligt att reduktionen av dessa är högre än av de tåliga bakterierna, d.v.s. högre än $2,4 \log_{10}$. Vidare är parasiter som genererar cystor och oocyster (*Giardia* och *Cryptosporidium*) större än den sporbildande bakterie som användes i studien (*Cl.perfringens*) och därför troligen mer reduktionsbenägna.

Endast Gråbosand med ett lager med IOCO-sand uppvisade en absolut barriär; det upptäcktes inga bakterier vid något tillfälle i utgående vatten från dessa kolonner. Fluorescerande partiklar upptäcktes dock i utgående vatten men huruvida dessa kom från faktiska beads eller inte, går inte att avgöra. Värdena låg kring det bakgrundsbruset som antogs vara av annat slag än beads.

Resultatet tyder på att den mesta avskiljningen av bakterier skedde den första halvmetern och första metern för hydrofila fluorescerande konstgjorda partiklar. Att bedöma om beads har trängt djupare än 1 m är svårt p.g.a. bakgrundsbruset.

Det visade sig inte vara helt enkelt att med flödescytometri mäta fluorescerande konstgjorda och naturliga partiklar i grundvattenssammanhang. Den höga bakgrundsstrålningen tyder på att det fanns en ansevärd del av andra fluorescerande partiklar som störde mätningarna. Således pekar undersökningen på att det finns ett behov av verifierande studier kring metoden för just användning i markvatten.

Sammantaget visar studien att den mikrobiologiska barriärverkan, med avseende på bakterier och protozoa, var god i en omättad zon om 4 m ($2,4 \log_{10}$) och kunde likställas med t.ex. klordesinfektion ($2 \log_{10}$) men var något sämre än kemisk fällning ($3\text{--}4 \log_{10}$ för bakterier och virus).

10 Reduktion av naturligt organiskt material

10.1 Introduktion

Följande kapitel behandlar omättad zons och IOCO-sandens förmåga att avskilja organiskt material i sand från Gråbodeltat. Analysen innefattar de perioder som inte utsattes för tillsatsexperiment. Tillsatserna innehöll visserligen höga halter av organiskt material som härrörde från fagodlingen men detta bedömdes vara av en annan typ än den som fanns i inkommande råvatten (se kapitel 8 Reduktion av bakteriofager) och därmed inte helt relevant. Därför sattes fokus på de perioder då tillsatsexperimenten inte utfördes och då vatten från Delsjöarna användes som råvatten till kolonnerna.

10.2 Metod

Ett flertal olika analyser tillämpades för undersökningen. COD_{Mn} (Chemical Oxygen Demand, mg O₂/l) som mäter hur mycket syre som förbrukas vid kemisk oxidation med kaliumpermanganat. TOC (Total Organic Carbon, mg/l) som är ett mått på organiskt material vid en starkare oxidation än COD_{Mn}. Oxidation sker vid hög temperatur och bildad koldioxid mäts med IR-detektor. UV-absorbans vid 254 nm är ett mått på organiskt material och brukar karaktärisera humus. Vid belysning absorberas strålning vid 254 nm av en typ av bindning som ofta förekommer i humus. Provet filtrerades genom 0,45 µm filter innan analys. Dessa analyser genomfördes av laboratoriet på Göteborgs va-verk (TOC på Alcontrol) enligt standardprotokoll.

Analys av AOC (assimilerbart organiskt kol) är en bioassay-metod där man kvantitativt bestämmer halten av det organiska kolet som kan utnyttjas av bakterier för tillväxt. Det är ett mått på potentialen för bakterietillväxt i distributionsnätet. Om provvattnet innehåller tillräckliga halter av näringsämnen (AOC-lättmetaboliserbart kol), kan bakterier som har överlevt renings- och desinfektionsprocesser börja växa till. Analysprinciperna går ut på att AOC-halter

bestäms på basis av den maximala tillväxtnivån som uppnås av kända bakterier (teststammar), renkulturer av t.ex. *Pseudomonas fluorescens*, *Aquaspirillum* spp.

Vattenprover togs två gånger i alla kolonner samt i råvattnet under experiment 4 i september 2005. Proverna ympades med låg halt (200–500 cfu/mL) av testbakterier och inkuberades vid 20 °C. Tillväxtkurvan bestämdes genom periodisk koloniantalbestämning vilket gjordes dag 3, 7 och 14 från de ympade provflaskorna. Den för testorganismen tillgängliga AOC-koncentrationen kalkylerades från det maximala koloniantalet (N_{max}) och utbytesfaktorn (Y). AOC sammanställdes i tabell och resultatet jämfördes med erfarenhetsvärden och Persson (2005).

Erfarenhetsmässigt (SMI: Smittskyddsinstitut) ligger obehandlade grundvatten inom 10–20 µg AOC/L. Om ett dricksvattenprov innehåller mellan 40–50 µg AOC/L bedömer SMI det som en något förhöjd halt. Halterna över 50 µg AOC/L i ett dricksvattenprov bedöms ge en indikation av att det kan finnas en risk för bakteriell tillväxt ute i nätet.

För att uppskatta Gråbomaterialets förmåga att avskilja den fraktion av organiskt material som medverkar i bildandet av desinfektionsbiprodukter, analyserades Trihalometanbildningspotentialen (Clesceri *et al.* 1998). Prover togs en gång i alla kolonner samt i råvattnet till kolonnerna och i filtrat efter kolfilterna på Lackarebäckverket som jämförelse. Proverna behandlades med klor på WET, Chalmers och analyserades därefter med avseende på triklormetan, bromdiklormetan, dibromklormetan, tribrommetan och summan av dessa fyra. Jämförelsen gjordes med Statens Livsmedelsverks gränsvärden (SLVFS 2001:30) och Lackarebäcks blandfiltrat.

Analysresultaten av COD, TOC och UV₂₅₄ sammanställdes statistiskt och reduktionen beräknades som skillnaden mellan medianvärdet i råvatten och medianvärdet av det studerade fallet relaterat till råvattenvärdet i form av % reduktion. Medianen är det värde som ligger i mitten av en mängd värden och den påverkas inte av enskilda extrema toppvärden, vilket ett medelvärde gör.

10.3 Råvatten

Halten organiskt material i råvattnet var relativt låg och låg på en halt av COD_{Mn} mellan 4 och 7 mg/l

O₂, 4 och 6 mg/l TOC respektive 0,092 och 0,202 ae/cm i Uv-absorbans vid 254 nm (Tabell 10-1).

10.4 Period 1

Prover togs efter 2 m omättad zon (GVY-0,1 m) och efter ytterligare 3,5 m mättad zon (GVY-3,5). Resultatet (Tabell 10-2) visade att COD reducerades

från 4,3 mg/l till 2,2 mg/l efter 2 meter med omättad zon, vilket är 54 %, för att därefter reduceras till 1,5 mg/l efter ytterligare 3,5 m med mättad zon, vilket är totalt 67 %. TOC reducerades från 4,8 mg/l till 3,1 mg/l efter 2 meter med omättad zon, vilket är 28 %, för att reduceras till 1,9 mg/l efter ytterligare 3,5 m med mättad zon, vilket är totalt 56 %. UV₂₅₄ reducerades från 0,140 ae/cm till 0,084 ae/cm efter 2 meter med omättad zon, vilket är 40 %, för att reduceras till 0,047 ae/cm efter ytterligare 3,5 m med mättad zon, vilket är totalt 66 %.

Tabell 10-1. Organiskt material i råvatten till kolonnerna mellan 2004-04-13 och 2005-09-14.

Parameter	Antal prov	Medel	Median	Min	Max	Stdav ¹	CV (%) ²
TOC (mg/l)	23	4,4	4,3	3,8	5,5	0,5	11
COD _{Mn} (mg/l O ₂)	33	5,2	4,8	3,9	6,8	0,9	18
UV 254nm (ae/cm)	55	0,14	0,14	0,092	0,202	0,03	21

1) Standardavvikelse

2) CV=(standardavvikelse/medelvärde)*100

Tabell 10-2. Organiskt material i utgående vatten i period 1, mellan 2004-03-03 och 2004-05-05. Tabellen innehåller resultat samlat från alla kolonnerna. Reduktionen är beräknad från värden redovisade i tabell 10-1.

Parameter	Djup under GYV (m)	Antal prov	Medel	Median	Min	Max	Stdav ¹	CV (%) ²	Reduktion (%) (räknat på medianvärdet)
CODMn (mg/l O ₂)	0,1	45	2,2	2,2	1,3	2,9	0,39	17,97	54
CODMn (mg/l O ₂)	3,5	44	1,4	1,5	0,8	2,0	0,3	19,3	67
TOC (mg/l)	0,1	5	3,1	3,1	2,9	3,3	0,20	6,45	28
TOC (mg/l)	3,5	5	2,0	1,9	1,9	2,3	0,2	8,7	56
UV 254 nm (ae/cm)	0,1	40	0,086	0,084	0,039	0,143	0,03	29,08	40
UV 254 nm (ae/cm)	3,5	39	0,051	0,047	0,033	0,086	0,014	26,9	66

1) Standardavvikelse

2) CV=(standardavvikelse/medelvärde)*100

Tabell 10-3. UV 254 nm (ae/cm) (filtrerat) för kolonnerna i period 1, mellan 2004-03-03 och 2004-05-05, strax under grundvattenytan (2 m omättad zon), grupperat från lägsta till högsta medelvärde.

Kolonn	Antal prov	Medel	Median	Min	Max	Stdav ¹	CV (%) ²	Reduktion per meter (ae/cm/m) (räknat på medianvärdet)	Reduktion för 2 m omättad zon (%) (räknat på medianvärdet)
K3	8	0,078	0,081	0,058	0,102	0,018	23,04	0,030	42
K1	8	0,079	0,074	0,049	0,138	0,028	35,23	0,033	47
K2	8	0,081	0,082	0,039	0,105	0,024	29,74	0,029	41
K4	8	0,089	0,085	0,062	0,125	0,024	26,69	0,028	39
K0	8	0,104	0,107	0,069	0,143	0,027	25,47	0,017	24
Reduktionsspann:								0,025±0,008	35,5±11,5

Tabell 10-4. COD_{Mn} (mg/l O_2) strax under grundvattenytan för kolonnerna (2 m omättad zon) i period 1, mellan 2004-03-03 och 2005-04-05 grupperat från lägsta till högsta medelvärde.

Kolonn	Antal prov	Medel	Median	Min	Max	Stdav ¹	CV (%) ²	Reduktion (mg/l/m) (räknat på medianvärdet)	Reduktion för 2 m omättad zon (%) (räknat på medianvärdet)
K1	9	2,1	2,2	1,3	2,5	0,5	22	1,3	54
K3	9	2,1	2,2	1,4	2,7	0,4	17	1,3	54
K2	9	2,1	2,3	1,5	2,4	0,3	16	1,25	52
K4	9	2,3	2,3	1,6	2,8	0,3	15	1,25	52
K0	9	2,4	2,4	1,4	2,9	0,5	19	1,2	50
Reduktionsspann:								1,25±0,05	52±2

1) Standardavvikelse

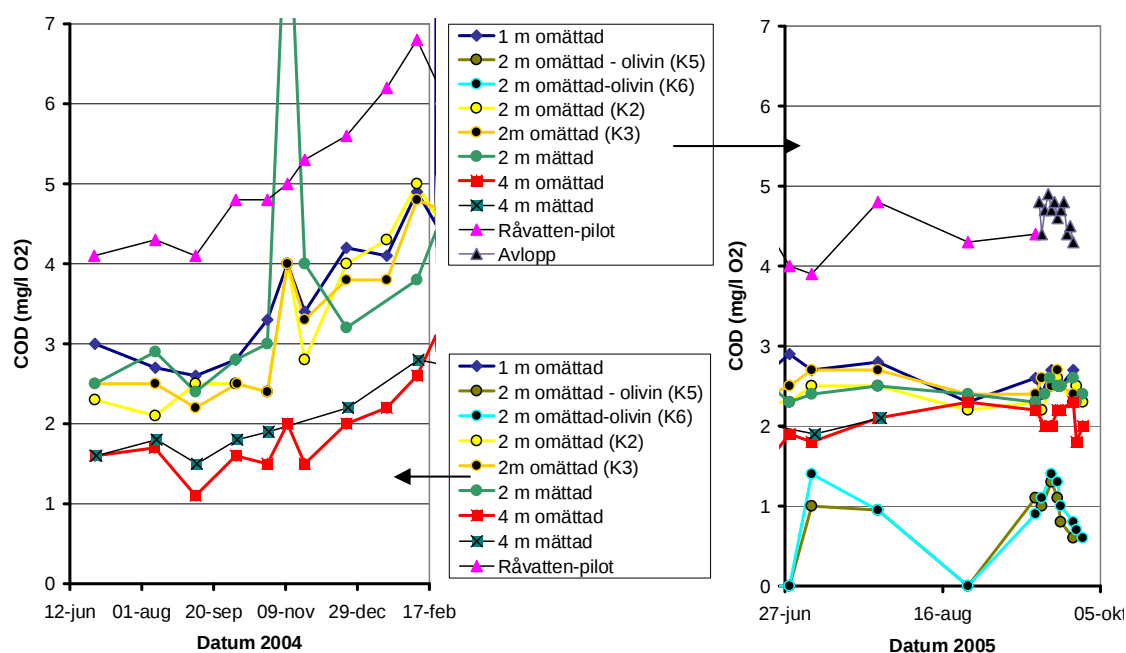
2) CV=(standardavvikelse/medelvärde)*100

Tabell 10-3 och 10-4 redovisar resultatet med avseende på en jämförelse mellan kolonnerna. Resultatet visar på att reduktionsspannet för alla kolonner var $0,025 \pm 0,008$ ae/c/m för UV_{254} och $1,25 \pm 0,05$ mg/l/m för COD_{Mn} . UV-absorbansen tycks ha varierat mer än COD_{Mn} . Anmärkningsvärt var att K0 presterade sämst och K1 var bland de bästa för både UV-absorbans och COD. Möjligen försvagar detta faktum den observerade skillnaden i reduktion mellan de olika fallen i period 2. Å andra sidan representerar dessa resultat troligen inte helt situationen för K0 då det översta lagret byttes ut efter tillsatsexperiment 1 p.g.a. igensättningar. Möjligen kan den sämre reduktionen av organiskt material härledas till detta byte.

10.5 Period 2

Flera olika analyser gjordes av analysresultaten före det första tillsatsexperimentet för kolonnerna med olika grad av mättad och omättad zon, där jämförelserna grundade sig på antingen uppehållstid eller djup. Prover togs strax under grundvattenytan (GVY-0,1 m) i de omättade kolonnerna inklusive dem som hade IOCO-sand, samt 2 m (Yta-2m) och 4 m (Yta-4m) under ytan i den mättade kolonnen.

Figur 10-1 visar hur de olika kolonnerna reducerade organiskt material i råvattnet från Delsjöarna. Under perioden före tillsatserna (vänster i figuren)



Figur 10-1. De studerade perioderna med avseende på COD_{Mn} . Till vänster perioden före alla tillsatsundersökningarna och till höger perioden efter experiment 3, som också inkluderar tillsatsförsök 4 i september 2005.

ökade råvattenkoncentrationen med tiden och utgående kvalitet ur kolonnerna följde denna trend. Det bör betyda att avskiljningen var konstant med avseende på koncentration och att Gråbomaterialet var begränsande, d.v.s. att det inte fanns utrymme för en ökad reduktion vid en högre inkommande koncentration och att reduktionskapaciteten per meter var uppnådd för de rådande hydrauliska förhållandena. Diagrammet visar att reduktionen oavsett vattenmättnad ökade med ökat djup. Faktum är att det inte märktes någon skillnad mellan mättad och omättad zon, d.v.s. det reducerades lika mycket vid bägge förhållanden.

Under perioden från 27 juni till 5 oktober 2005 hade råvattenkoncentrationen återgått till ursprunglig nivå och kolonnerna uppvisade en lägre koncentration av organiskt material. Reduktionen kolonnerna emellan hade dock blivit mer lika och det gick inte att se någon direkt skillnad mellan fallen. De uppvisade nästan samma utgående koncentration; 2–3 mg/l oavsett mättnad och djup. Anledningen är inte tydlig men kan vara att kolonnerna vid denna tidpunkt varit igång under ca 1,5 år och därför fungerade annorlunda med avseende på t.ex. biologisk nedbrytning, speciellt på ytan av kolonnen. Denna

upptäckt innebär möjligen att en dominerande del av avskiljningen faktiskt har skett i de ytliga lagrena i det senare skedet; mer än vad tidigare period avslöjat. Vidare kan det betyda att skillnaden mellan kolonnerna är av mindre betydelse vid en hög mikrobiologisk aktivitet och således att djup av omättad zon inte har en avgörande betydelse för reduktionseffektiviteten av organiskt material. De två tillkomna kolonnerna med Gråbosand och IOCO-sand uppvisade en markant bättre reduktion än de övriga kolonnerna, även jämfört med perioden före tillsatserna då de övriga kolonnerna var nya.

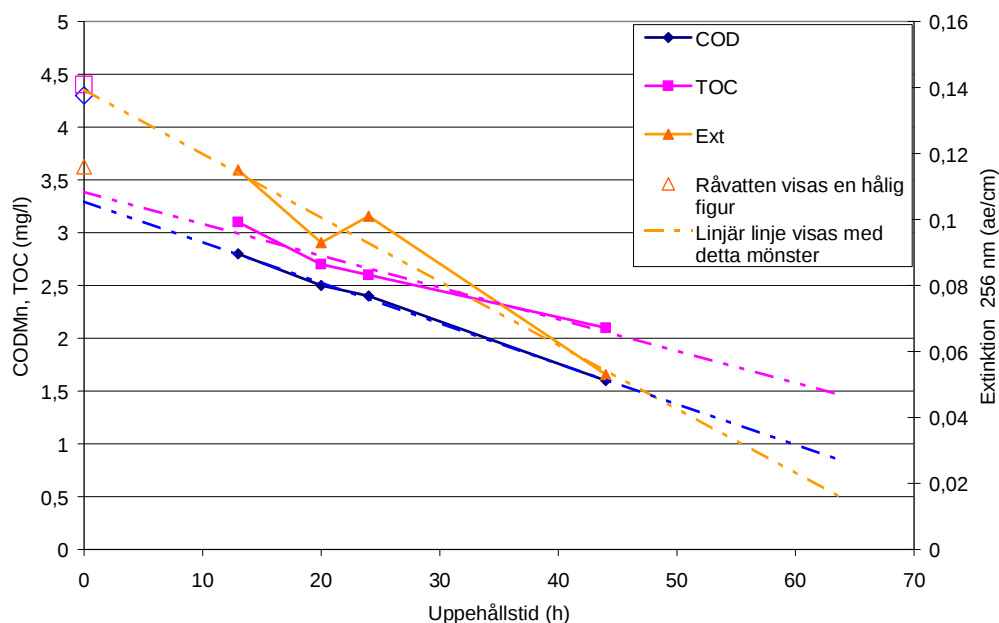
10.5.1 Reduktion i omättad zon

Resultatet (Tabell 10-5) visade på en linjär reduktion av organiskt material för COD_{Mn}, TOC och UV-absorbans 254 nm (Figur 10-2). Reduktionen för 2 m omättad zon låg på ca 43 % COD_{Mn}, 40 % TOC och 16 % UV-absorbans. Den totala reduktionen för 4 meter omättad zon låg på 63 % COD_{Mn}, 52 % TOC och 54 % UV-absorbans.

Fördelningen av olika typer av organiskt material tycks ha förändrats beroende på djup av zon, uttryckt

Tabell 10-5. Avskiljningen i omättad zon. Beräkningar baserade på medianvärdet av analysresultat under perioden före tillsatsexperimenten mellan 2004-06-08 och 2004-10-27.

Kolonn	Omättad zon (m)	Uppehållstid (h)	COD _{Mn} (mg/l)	UV ₂₅₄ (ae/cm)	TOC (mg/l)	COD/TOC (–)	UV ₂₅₄ /TOC L/mg/m
Råvatten	0	0	4,3	0,116	4,4	0,98	2,6
K4	1	13	2,8	0,115	3,1	0,90	3,7
Reduktion			35 %	<1 %	30 %		
K3	2	20	2,5	0,093	2,7	0,93	3,4
Reduktion			42 %	20 %	39 %		
K2	2	24	2,4	0,101	2,6	0,92	3,9
Reduktion			44 %	13 %	41 %		
K1	4	44	1,6	0,053	2,1	0,76	2,5
Reduktion			63 %	54 %	52 %		
Reduktion per meter (totalt)			0,67 mg/l/m	0,016 ae/cm/m	0,58 mg/l/m		
Reduktion per timme (totalt)			0,061 mg/l/h	0,0014 ae/cm/h	0,052 mg/l/h		
Reduktion första metern (K4)			35 %	<1 %	30 %		
Reduktion mellan 1 och 4 m (K1 minus K4)			28 %	53 %	22 %		



Figur 10-2. Reduktion av organiskt material som funktion av uppehållstid i omättad zon för perioden 2004-06-08 och 2004-10-27.

som COD_{Mn}/TOC och UV₂₅₄/TOC. Initialt (vid ytan kanske?) skedde en större reduktion av TOC-relaterade typer (UV₂₅₄/TOC faktorn ökar) medan UV-relaterade typer verkar ha reducerats mer på djupet (faktorn minskade; avskiljningen UV₂₅₄ ökade mer än avskiljningen av TOC). Detta faktum stärktes av beräkningarna av reduktionen för första metern (representerad av K4) där avskiljningen av TOC och COD låg kring 30 % medan reduktionen av UV-absorbans var försumbar. Mellan 1 och 4 meter var förhållandet däremot det omvända och reduktionen för TOC och COD minskade till 22–28 % medan reduktionen av UV-absorbansen ökade

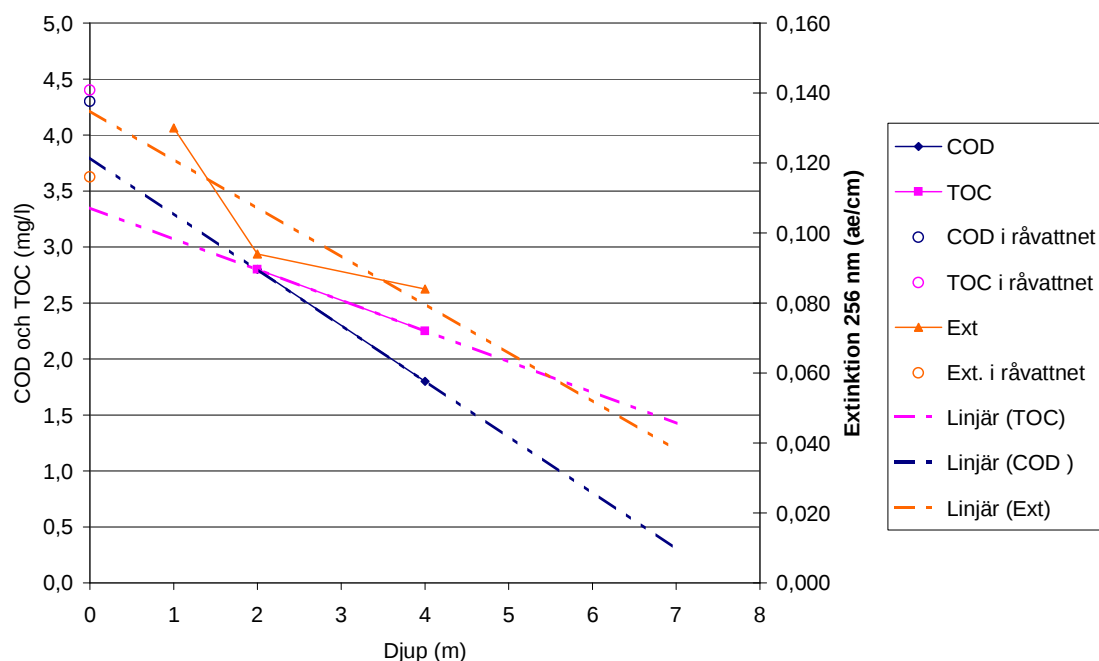
markant till 53 %. Reduktionen per längd och tid redovisas även den för jämförelse med omättade förhållanden och IOCO-sand.

10.5.2 Reduktion i mättad zon

Resultaten (Tabell 10-6) visar på en linjär reduktion av organiskt material för COD_{Mn}, TOC och UV-absorbans 254 nm i mättad zon (Figur 10-3, nedan). Reduktionen för 2 meter mättad zon låg på ca 35 % COD_{Mn}, 36 % TOC och 19 % UV-absorbans. Den totala reduktionen för 4 meter mättad zon låg på

Tabell 10-6. Beräkningar av reduktionen i mättad zon baserad på medianvärdet av analysresultat före tillsats-experiment 1 mellan 2004-06-08 och 2004-10-27. * Inte mätt men antas vara 2 gånger uppehållstiden för 2 m.

Kolonn	Mättad zon (m)	Upphållstid (h)	COD _{Mn} (mg/l)	UV ₂₅₄ (ae/cm)	TOC (mg/l)	COD/TOC (–)	UV ₂₅₄ /TOC L/mg/m
Råvatten	0	0	4,3	0,116	4,4	0,97	2,6
K0	1	–	–	0,130	–	–	–
Reduktion	–	–	–	–12 %	–	–	–
K0	2	39	2,8	0,094	2,8	1,0	3,4
Reduktion	–	–	35 %	19 %	36 %	–	–
K0	4	78*	1,8	0,084	2,3	0,92	3,6
Reduktion	–	–	58 %	28 %	48 %	–	–
Reduktion per meter (totalt)			0,63 mg/l/m	0,008 ae/cm/m	0,47 mg/l/m	–	–
Reduktion per timme (totalt)			0,032 mg/l/h	0,0004 ae/cm/h	0,027 mg/l/h	–	–



Figur 10-3. Reduktionen av organiskt material som funktion av djup i mättad zon 2004-06-08 och 2004-10-27.

58 % COD_{Mn}, 48 % TOC och 28 % UV-absorbans. Resultatet tyder på en liknande förändring i fördelning av organiskt material som för omättad zon i den första delen av zonen i och med att faktorn UV₂₅₄/TOC reagerade på liknande sätt. Däremot tycks inte UV-relaterade fraktioner ha avskiljts effektivare på djupet, vilket observerades för omättad zon i och med att faktorn inte minskar vid 4 m. Det bör noteras att analysen är baserad på färre data för 1 och 4 m omättad zon.

10.5.3 Reduktion i omättad zon med IOCO-sand

Nedan finns resultatet av reduktionsberäkningarna sammanfört i tabell 10-7. Reduktionen för 2 meter omättad Gråbomaterial inklusive 0,3 m IOCO-sand låg på ca 80 % COD_{Mn}, 75 % TOC och 82 % UV-absorbans.

10.5.4 Jämförelse av omättad och mättad zon samt IOCO-sand

Vad fungerar bäst? För att jämföra mättade och omättade förhållanden samt IOCO-sandens betydelse, jämfördes 2 metersfallen, d.v.s. K0 (2m), K2, K3, K5 och K6. Resultatet från 2 m omättade förhållande gav en reduktion på ca 35 % UV-absorbans och 52 % COD_{Mn} för period 1 då alla kolonner hade samma konfiguration. Under period 2 hade den sjunkit till 16 % för UV-absorbans och 43 % för COD. För samma period låg reduktionen för 2 m mättad zon på 19 % för UV-absorbans och 35 % för COD_{Mn}, vilket var ungefär vad de omättade zonerna presterade. Fallen med IOCO-sanden visade på effektiv avskiljning med 82 % för UV-absorbans och 80 % för COD_{Mn}. Det betyder att lagret med 30 cm IOCO-sand ökade avskiljningen med en faktor på nästan 5 för UV-absorbans och 2 för COD_{Mn}.

Tabell 10-7. Median av analysresultat från 2 m omättat Gråbomaterial inklusive 0,3 m IOCO-sand perioden före första tillsatsexperiment mellan 2005-04-05 och 2005-04-25 (3 prov/kolonn). * Medelvärde från K2 och K3.

Kolonn	Uppehållstid (h)	COD _{Mn} (mg/l)	UV-absorbans (ae/cm)	TOC (mg/l)	COD _{Mn} /TOC (-)	UV ₂₅₄ /TOC (l/mg/m)
Råvatten		5,4	0,162	4,8	1,13	3,4
K5	22*	1,2	0,030	1,3	0,92	2,3
Reduktion (%)		78 %	81 %	73 %		
K6	22*	1,0	0,027	1,2	0,83	2,3
Reduktion (%)		81 %	83 %	75 %		

10.6 AOC

Persson (2005) redovisade resultat av AOC-analyser efter biologisk förbehandling i filter med kol och leca som bärrmedium. Resultatet visade på utgående koncentrationer av AOC på 25–34 µg/l för en kvalitet på ingående råvatten på 44 µg/l, vilket också var ungefär ingående kvalitet för kolonnerna under denna studie. Nedanstående tabell redovisar resultatet av analys av ett prov per kolonn före avloppsspikningen samt en gång per kolonn strax innan tillsatslösningen kopplades bort och då tillsatsexperimentet ansågs belasta kolonnerna som mest.

Generellt var halterna lägre än dem som Persson (2005) redovisat. Före tillsatsexperiment 4 låg nivåerna på 11–14 µg/l, möjligen med en trend som tydde på en bättre avskiljning i K1 samt K5 och K6.

Under tillsatsexperimentet var även K0 i klass med de redan nämnda.

10.7 Trihalometanbildningspotentialen

Enligt Statens dricksvattenföreskrift (Livsmedelsverket 2004) är gränsvärdet för tjänligt med anmärkning för trihalometaner 50 µg/L och gränsvärdet för otjänligt 100 µg/L.

Resultatet av undersökningen av trihalometanbildningspotentialen (Tabell 10-9) av filtrat från kolonnerna visar att 4 meter omättad zon sänkt potentialen ca 45 % jämfört med råvattnet. IOCO-sanden bidrog till en stark reducering av potentialen upp mot 76 %. Alla vatten hade en högre

Tabell 10-8. AOC-värden för råvatten och utgående vatten från kolonnerna.

Typ/zon	Kolonn	2005-09-14 AOC [µg/L]	2005-09-26 AOC [µg/L]
Råvatten	Pilot	42	
Spikvatten, avlopp blandat 15/9			9
2 mättad zon	K0	16	11
4 omättad zon	K1	11	14
2 omättad zon	K2	14	26
2 omättad zon	K3	13	18
1 omättad zon	K4	13	21
2 omättad zon	K5	11	16
2 mättad zon	K6	12	13

Tabell 10-9 Trihalometanbildningspotentialen 2005-09-14.

Typ/zon	Ko	Triklor- metan [µg/L]	Bromdiklor- metan [µg/L]	Dibromklor- metan [µg/L]	Tribrom- metan [µg/L]	Summa [µg/L]
Råvatten	Pilot	350	30	<5	<5	380
2 mättad zon	K0	–	–	–	–	–
4 omättad zon	K1	190	24	<5	<5	210
2 omättad zon	K2	230	25	<5	<5	250
2 omättad zon	K3	220	27	<5	<5	250
1 omättad zon	K4	280	24	<5	<5	300
2 omättad zon IOCO	K5	72	17	<5	<5	89
2 omättad zon IOCO	K6	71	16	<5	<5	87
Filtrat L-bäck		140	19	<5	<5	160

koncentration än det gränsvärde föreskrifterna godkänner som tjänligt, vilket för omättad zon innebar en 4–6 gånger högre halt. Även om det handlar om en mätning vid ett enda tillfälle, var slutsatsen att både omättad zon och IOCO-sanden bidrog positivt och troligen effektivt i den sammantagna¹⁴ reduktionen av de organiska fraktioner som deltar i bildningen av trihalometaner, även om halterna var mycket högre än de föreskrivna.

10.8 Diskussion och slutsatser

Resultaten (Tabell 10-10) visar att 4 m omättad zon reducerade organiskt material med 52–63 %, beroende på vilken parameter som studerades. Skillnaden för 4 m mättad zon låg främst hos UV-relaterade organiska fraktioner, som tycktes ha avskiljts sämre i mättade förhållanden. Dock visade undersökningen under period 1 att K0 fungerade sämst i reduktionen av organiskt material och med tanke på att denna kolonn sedermera användes till studien kring mättade förhållanden, kan skillnaden vara ännu mindre mellan omättad och mättad zon.

Resultatet föreslog en koncentrationsreduktion på 0,58–0,67 mg/l per meter omättat material och 0,47–0,63 mg/l per meter mättat material, även om man sannolikt kan räkna med en större initial reduktion i omättat material de första två metrarna; kanske upp mot 1,25 mg/l per meter, vilket experimenten i period 1 visade. Den observerade linjära relationen ner till 4 m omättad zon gäller för just 4 m. Därefter fanns inga indikationer på hur sambandet ser ut efter 4 m men troligt är att reduktionen per meter minskar, eftersom det generellt finns kvar organiskt material i brunnar trots långa transportsträckor.

Resultatet visar på att ett lager av 30 cm IOCO-sand i Gråbomaterialet kraftfullt förstärkte reduktionen av organiskt material i 2 m omättad zon för Gråbomaterial. För UV-absorbans var ökningen nästan 5 gånger så stor och för COD_{Mn} var den 2 gånger så stor.

Analysen var baserad på perioden innan tillsats-experimenten genomfördes. Efter dessa experiment visade resultatet att skillnaden mellan kolonnerna

Tabell 10-10. Resultaterande reduktion av organiskt material, beräknad för 4 meters djup av zon.

Omättad zon			
	COD _{Mn}	UV ₂₅₄	TOC
Reduktion 4 m	63 %	54 %	52 %
Reduktion per meter (totalt)	0,67 mg/l/m	0,016 ae/cm/m	0,58 mg/l/m
Reduktion per timme (totalt)	0,061 mg/l/h	0,0014 ae/cm/h	0,052 mg/l/h
Mättad zon			
	COD _{Mn}	UV ₂₅₄	TOC
Reduktion 4 m	58 %	28 %	48 %
Reduktion per meter (totalt)	0,63 mg/l/m	0,008 ae/cm/m	0,47 mg/l/m
Reduktion per timme (totalt)	0,032 mg/l/h	0,0004 ae/cm/h	0,027 mg/l/h

hade minskat, vilket tolkades som en konsekvens av en ökad mikrobiologisk aktivitet, speciellt i ytan, och därmed en ökad biologisk nedbrytning av det organiska materialet. Denna upptäckt innebär möjligen att en dominerande del av avskiljningen faktiskt har skett i de ytliga lagrena i det senare skedet; mer än vad tidigare period avslöjat. Vidare kan det betyda att skillnaden mellan kolonnerna är av mindre betydelse vid en hög mikrobiologisk aktivitet och således att djup av omättad zon inte har en avgörande betydelse för reduktionseffektiviteten av organiskt material utan att det är ytans egenskaper som är avgörande för hur effektiv reduktionen blir.

Undersökningen av AOC visade att förutsättningarna för att förhindra efterväxt i efterkommande distribution var goda i utgående vatten från kolonnerna. I jämförelse med biologisk förbehandling av samma vatten i kolfilter, var de till och med bättre.

Undersökningen visade att både omättad zon och IOCO-sanden bidrog positivt och troligen effektivt i den sammantagna reduktionen av de organiska fraktioner som deltar i bildningen av trihalometaner.

14 Summan av avskiljning och produktion.

11 Sammanfattande slutsatser

Den mikrobiologiska barriärverkan med avseende på virus var god i en omättad zon om 4 m ($3 \log_{10}$) och var högre än klordesinfektion ($2 \log_{10}$) och lika hög som kemisk fällning ($3-4 \log_{10}$ för bakterier och virus). Barriärverkan var högre i omättad zon än i mättad zon. Järnoxidtäckt olivinsand förstärkte kraftigt virusreduktionen i omättad zon ($5-6 \log_{10}$ för $\Phi X174$ och $4-5 \log_{10}$ för MS-2) och kan med fördel användas i syfte att förstärka barriärverkan i tunnare mäktigheter med omättad zon.

Den mikrobiologiska barriärverkan med avseende på bakterier och protozoa var god i en omättad zon om 4 m ($\geq 2,4 \log_{10}$) och kunde likställas med klordesinfektion ($2 \log_{10}$) men var något sämre än kemisk fällning ($3-4 \log_{10}$ för bakterier och virus). Det upptäcktes ingen skillnad i effektivitet mellan omättad och mättad zon men det kan bero på att genombrotten av bakterier var för svaga för att utreda om det fanns någon skillnad. Resultatet visar att järnoxidtäckt olivinsand sannolikt förstärkte bakteriereduktionen i omättad zon och kan med fördel användas i syfte att förstärka den mikrobiologiska barriärverkan i tunnare mäktigheter med omättad zon.

Reduktionseffektiviteten med avseende på organiskt material var god i en omättad zon om 4 m med upp till 63 % reduktion av COD_{Mn} . Reduktionen var lägre under mättade förhållanden, framför allt med avseende på humusrelaterat material. Resultatet visar att ett lager på 30 cm IOCO-sand i Gråbo-materialet kraftigt förstärkte reduktionen av organiskt material i 2 meter omättad zon för Gråbo-material. För UV-absorbans var ökningen nästan 5 gånger så stor och för COD_{Mn} var den 2 gånger så stor.

Undersökningen indikerade en god reduktion i den omättade zonen av lättnedbrytbart organiskt material och organiskt material som deltar i trihalometanbildning.

12 Kunskapsbehov

Studien har bara behandlat en typ av sandmaterial från Gråbo. Hur fungerar andra naturliga material? En studie där fler material testades skulle ge kunskap om de skillnader som råder i olika anläggningar. Problemet ligger i att jämföra resultat från olika anläggningar. Det bör finnas ett sätt att standardisera relaterade mineralogiska, geologiska och hydrogeologiska parametrar till reduktionen. Parametrar som storleksfördelning, d_{10} och d_{60} , bergart, uppehållstid, hydraulisk konduktivitet och magasin-koefficient är möjliga att bestämma för en anläggning med relativt lätta metoder som siktning, okulär undersökning, ICP-analys, spårämnesförsök och provpumpning.

IOCO-sanden uppvisar mycket goda egenskaper för att reducera virus och avskilja organiskt material. Sanden kan användas som ett komplement i en befintlig infiltrationsbassäng för att förstärka kapaciteten vid t.ex. tunna skikt med omättad zon eller korta uppehållstider i akviferen. Dock återstår att svara på frågeställningar kring drift, utlösning av ämnen från sanden, ackumuleringskapacitet för att avgöra livslängden innan regeneration eller utbyte krävs, samt metoder för att regenerera IOCO-sanden. Det vore också av stort intresse att undersöka IOCO-sandens förmåga att avskilja problemämnen som uran, fluorid, syntetiska organiska ämnen, bekämpningsmedel, läkemedelsrester och mangan.

Det är en vanlig uppfattning att bakterier och protozoa inte passerar en konstgjord infiltration. Resultatet i denna studie visar att det är sant till viss del. Men även om huvuddelen tycks avskiljas relativt tidigt i sanden återfanns ändå vissa tåliga bakterier i utgående vatten efter 4 m omättad zon och i sanden på 3,5 meters djup. Med tanke på att det krävs få protozoa för att smitta en människa krävs det en högre reduktion än de $2,4 \log_{10}$ som studien pekar på. Det är således relevant att fortsätta studien av transport av bakterier och protozoa i omättad och mättad zon, med högre koncentrationer av tåliga bakterier. Detta bör göras med tillsatser av odlade tåliga bakterier, som t.ex. *Cl.perfringens*, under lång tid för att få tydliga genombrott och för att täcka in eventuella vandringer.

Referenser

Berggren, D., Jonsson, E., Johansson, P.-O., Gustafsson, J. P. & Abrahamsson, J. 2004. *Filter av IOCO-sand för avskiljning av naturligt organiskt material vid dricksvattenrening*. VA-Forsk rapport 2004-01.

Blomberg, J (red). 1999. *Konstgjord grundvattenbildning. Avskiljning av organiskt material i den omättade zonen*. VA-Forsk rapport 18/1999.

Chang, Y., Li, C.-W. & Benjamin M. M. 1997. *Iron oxide-coated media for NOM sorption and particulate filtration*. J. AWWA, Vol. 89, 100–113.

Clesceri *et al.* 1998 *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington, 1998, metod 5710 B.

Dahlberg, B. & Lundh, M. (2005) *Vattenkvaliteten i Mjörn 2002–2005*. Internrapport. Göteborgs va-verk, Göteborg 2005-12-09.

EC project ENV4-CT95-0071. Artificial recharge of groundwater. Final report. European Commission. ISBN: 92-894-02186-9. Luxembourg; Office for official publication of the European Communities.

Engblom, K. & Lundh, M. 2006. *Mikrobiologisk barriärverkan vid konstgjord grundvattenbildning – en litteraturstudie om påverkande faktorer*. Svenskt Vatten, VA-Forsk 2006-10.

Findlay, R. H., King, G. M. & Watling, L. 1989. *Efficiency of phospholipid analysis in determining microbial biomass in sediments*. Applied and Environmental Microbiology Vol 55, 288.

Frycklund, Cristina 1998. *Artificial recharge of groundwater for public water supply*. Diss. KTH, Stockholm, ISBN 91-7170-270-9.

Hanson, Göran. 2000. *Konstgjord grundvattenbildning. 100-årig teknik inom svensk vattenförsörjning*. VA-Forsk rapport 2000:5.

Huisman, O. 1983, *Artificial Groundwater Recharge*, PITMAN Books Limited, ISBN 0-273-08544-1.

Jonsson, E. 2003. *Removal of Aquatic Natural Organic Matter by Iron Oxide Coated Olivine*. Lic.Avh. No 32. SLU. Avdelningen för markvetenskap, SLU.

Juhna, Talis. 2002. *Aspects of drinking water supply in areas of humic water*. Licentiatavhandling 2002:27 , LuTH, Luleå

Jørgensen, Peters & Eschweiler. *Removal of pathogenes and monitoring of microbiological changes during artificial recharge*. EC project ENV4-CT95-0071. Artificial recharge of groundwater. Final report. European Commission. ISBN: 92-894-02186-9. Luxembourg: Office for official publication of the European Communities.

Jin Y., Chu Y., Li Y., 2000. *Virus removal and transport in saturated and unsaturated sand columns*. Journal of Contaminant Hydrology 43, 111–128.

Leclerc H., Edberg S., Pierzo, V., Delattre J.M., 2000. *Bacteriophages as indicators of enteric viruses and public health risks in groundwater*. Journal of Applied microbiology 88, 5–21.

Livsmedelsverket 2004; SLVFS 2001:30 och vägledning.

Logsdon, G.S., Kohne, R., Abel, S. & LaBonde, S. (2002) *Slow sand filtration for small water systems*. J.Environ.Eng.Sci.1:339–348.

Löfgren, S. 2002. Humusens regionala och temporala variationer i svenska yt-vatten. Abstracts från konferensen Omsättning och effekter av humusämnen i sjöar, vattendrag och havsområden. Vetenskapsrådet.

McMeen, C. R. & Benjamin, M. M. 1997. *NOM removal by slow sand filtration through iron oxide-coated olivine*. J. AWWA, Vol. 89, 57–71

Pang L., Close M., Goltz M., Sinton L., Davies H., Hall C., Stanton G., 2003. *Estimation of setback distances based on transport of E.coli and F-RNA phages*. Environment International 29, 907–921.

Persson, F. 2005. *Biofilms in Drinking Water Treatment. Biofiltration, Membrane Fouling and Regrowth Potential*. Diss. ISBN: 91-628-6715-6. Göteborgs Universitet.

Rådmark & Svensson 2003. *Reningspotentialen av främst organiskt material i omättad zon vid konstgjord grundvattenbildning – Uppstart av kolonnförsök för att studera Gråbo isälvsdelta*. Report 2003:21. Exjobb vid WET, Chalmers

Schijven, Jack, F. 2001. *Virus Removal from Groundwater by soil passage – Modeling, field and laboratory experiments*. Diss. Publicerad av Ponsen&Looijen B.V., Wageningen, Nederländerna. ISBN 90-646-4046-7.

Smittskyddsinstitutet, 2005. <http://www.smittskyddsinstitutet.se>

Stenström, Hoffner & Brömsen. 1981. *Reduktion av bakterier och virus vid avloppsinfiltration i mark – En kunskapssammanställning*. Naturvårdsverket. Rapport snv pm 1329.

Sundlöf & Kronqvist. (1992). *Konstgjord grundvattenbildning – Nulägesbeskrivning av tjugo svenska anläggningar*. VA-Forsk rapport 1992:13.

Urfer, D. & Huck, P. 2001. *Measurements of biomass activity in drinking water biofilters using a respirometric method*. Wat. Res., Vol 35, 1469–1477.

WHO 2004. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. Third Edition. Recommendations. World Health Organization, Geneva, ISBN 92 4 154638 7 (NLM Classification: WA 675).

Bilaga A Typiskt provtagningsschema period 2

Vecka	24	24	25	25	25	25	27	27	27
Provdag	2004-06-08	2004-06-09	2004-06-14	2004-06-15	2004-06-16	2004-06-18	2004-06-28	2004-06-29	2004-06-30
Paket	A	A	Syre	B	B	B	Syre	C	C
Provpunkt	K0: YTA-2.0m GVY-2.0m	K0: YTA-4.0m GVY-4.0m	K0: Yta-5.4m GVY-5.4m	K0: YTA-2.0m GVY-2.0m	K0: YTA-4.0m GVY-4.0m	K0: YTA-1.0m GVY-1.0m	K0: Yta-5.4m GVY-5.4m	K0: YTA-2.0m GVY-2.0m	K0: YTA-4.0m GVY-4.0m
Provpunkt	K1: YTA-4.0m GVY-0.1m		K1: Yta-5.4m GVY-1.5m	K1: YTA-4.0m GVY-0.1m	K1: YTA-5.0m GVY-1.1m		K1: Yta-5.4m GVY-1.5m	K1: YTA-4.0m GVY-0.1m	
Provpunkt	K2: YTA-2.0m GVY-0.1m		K2: Yta-5.4m GVY-3.5m	K2: YTA-2.0m GVY-0.1m	K2: YTA-3.0m GVY-1.1m		K2: Yta-5.4m GVY-3.5m	K2: YTA-2.0m GVY-0.1m	
Provpunkt	K3: YTA-2.0m GVY-0.1m		K3: Yta-5.4m GVY-3.5m	K3: YTA-2.0m GVY-0.1m	K3: YTA-3.0m GVY-1.1m		K3: Yta-5.4m GVY-3.5m	K3: YTA-2.0m GVY-0.1m	
Provpunkt	K4: YTA-1.0m GVY-0.1m		K4: Yta-5.4m GVY-4.5m	K4: YTA-1.0m GVY-0.1m	K4: YTA-2.0m GVY-1.1m		K4: Yta-5.4m GVY-4.5m	K4: YTA-1.0m GVY-0.1m	
Provpunkt			Råvatten ovan kolonn	Råvatten ovan kolonn			Råvatten ovan kolonn	Råvatten ovan kolonn	
Paket	A	A	Syre	B	B	B	Syre	C	C
Analys:									
Provtemp.	Ja	Ja		ja	ja	ja		Ja	Ja
Turbiditet	Ja	Ja		ja	ja	ja		Ja	Ja
PH	Ja	Ja		ja	ja	ja		Ja	Ja
Temperatur och Syre			Ja				Ja		
Oxygenmättnad			Ja				Ja		
COD _{Mn}								Ja	Ja
Konduktivitet	Ja	Ja		ja	ja	ja		Ja	Ja
Lukt (20)				ja	ja	ja			
Lukt (20) art				ja	ja	ja			
Kalcium								Ja	Ja
Magnesium								Ja	Ja
Natrium				Ja	Ja	Ja		Ja	Ja
Kalium								Ja	Ja
Jäm				Ja	Ja	Ja		Ja	Ja
Mangan				Ja	Ja	Ja		Ja	Ja
Aluminium icp				Ja	Ja	Ja		Ja	Ja
Alkalinitet								Ja	Ja
Fluorid								Ja	Ja
Klorid-ICP				Ja	Ja	Ja		Ja	Ja
Sulfat								Ja	Ja
Ammoniumkväve								Ja	Ja
Nitritkväve								Ja	Ja
Nitrat+Nitritkväve								Ja	Ja
Kväve total								Ja	Ja
Fosfor total								Ja	Ja
Extinktion254nm	Ja	Ja		Ja	Ja	Ja		Ja	Ja
TOC								Ja	Ja
Mikroorganismer 3d	Ja	Ja		Ja	Ja	Ja		Ja	Ja
Heterotrofer 20 7d				Ja	Ja	Ja		Ja	Ja
Koliformer 35, E Coli								Ja	Ja
Fek strep								Ja	Ja
Clostridier								Ja	Ja
Mögelsvamp								Ja	Ja
ATP-direkt	Ja	Ja		Ja	Ja	Ja		Ja	Ja
Flödescytometri	Ja	Ja		Ja	Ja	Ja		Ja	Ja

Bilaga B:1 Bakteriofagkoncentrationer under tillsatsexperiment 1

Tillsatsexperiment 1					
Nr00			Nr01		
Tid från tillsats	Test 1: x174	Test 1 : MS-2	Tid från tillsats	Test 1: x174	Test 1 : MS-2
h	ant/ml	ant/ml	h	ant/ml	ant/ml
-12	0	0	-12	0	0
11	0	0	11	0	0
28	0	110 000	28	10	650
32	2	205 000	32	28	1 050
34	5	150 000	34	52	3 075
36	6	170 000	36	100	8 500
38	10	265 000	38	200	10 750
39	10	240 000	39	202	19 750
40	13	240 000	40	230	19 250
41	20	405 000	41	184	18 000
42	11	725 000	42	264	18 250
43	14	875 000	43	400	28 000
45	30	700 000	45	500	30 000
47	45	1 125 000	47	104	25 000
49	47	1 850 000	49	120	35 000
56	117	1 900 000	56	225	43 000
59	144	2 500 000	59	225	43 500
83	1 730	3 700 000	83	1 400	26 500
155	2 500	2 300 000	155	900	83 000
203	4 300	1 500 000	203	350	33 000
251	6 000	1 400 000	251	380	7 000
323	13 000	1 150 000	323	300	3 000
395	14 000	830 000	395	600	900
491	87 000	527 000	491	20	250
				17	40
Nr02			Nr03		
Tid från tillsats	Test 1: x174	Test 1 : MS-2	Tid från tillsats	Test 1: x174	Test 1 : MS-2
h	ant/ml	ant/ml	h	ant/ml	ant/ml
-12	0	0	-12	0	0
11	0	0	11	29 250	3 475 000
17	0	40 750	12	137 500	8 500 000
18	1	30 500	13	330 000	35 250 000
19	2	15 750	14	502 500	42 000 000
20	5	8 500	15	1 050 000	54 750 000
21	33	3 000	16	925 000	40 500 000
22	58	1 750	17	975 000	43 750 000

Forts. på tabell					
Nr02			Nr03		
Tid från tillsats	Test 1: x174	Test 1 : MS-2	Tid från tillsats	Test 1: x174	Test 1 : MS-2
h	ant/ml	ant/ml	h	ant/ml	ant/ml
23	291	11 500	19	1 000 000	21 250 000
25	2 125	170 000	21	1 300 000	23 250 000
28	2 075	7 000 000	25	625 000	13 250 000
32	140 000	18 750 000	28	525 000	8 500 000
34	207 500	17 250 000	34	400 000	4 150 000
38	200 000	22 250 000	59	65 000	3 000 000
59	200 000	4 500 000	83	60 000	625 000
83	130 000	1 980 000	155	7 300	100 000
155	11 000	338 000	203	3 500	50 000
203	3 000	80 000	251	1 000	33 000
251	3 700	27 000	323	1 300	4 500
323	1 900	10 000	395	400	1 500
395	600	5 000	491	600	480
491	900	2 000		400	200
	850	700			
Nr04					
Tid från tillsats	Test 1: x174	Test 1 : MS-2			
h	ant/ml	ant/ml			
-12	0	0			
8	825 000	4 050 000			
9	2 375 000	40 250 000			
10	2 100 000	65 500 000			
11	2 825 000	67 500 000			
12	2 875 000	80 000 000			
13	2 850 000	70 000 000			
14	3 450 000	87 500 000			
16	2 625 000	57 000 000			
21	1 500 000	25 000 000			
25	1 275 000	30 000 000			
28	925 000	11 250 000			
34	390 000	5 950 000			
59	150 000	2 475 000			
83	95 000	2 250 000			
155	9 300	298 000			
203	2 700	105 000			
251	1 700	43 000			
323	780	14 000			
395	250	5 500			
491	500	2 400			
	400	700			

Bilaga B:2 Bakteriofagkoncentrationer under tillsatsexperiment 2

Tillsatsexperiment 2					
Nr00			Nr01		
Tid från tillsats	Test 2: x174	Test 2: MS-2	Tid från tillsats	Test 2: x174	Test 2: MS-2
h	ant/ml	ant/ml	h	ant/ml	ant/ml
-12	88	0	-12	23	0,5
11	88	0	11	25	0,2
20	2 600	102 000	30	3	0
25	29 295	1 133 333	34	0,2	5
30	43 329	1 580 000	40	1	300
34	80 000	1 720 000	60	1 225	427 500
40	60 000	2 100 000	68	3 200	505 000
60	200 000	3 420 000	82	14 000	410 000
68	487 000	1 800 000	92	16 000	500 000
82	342 000	1 350 000	111	25 300	600 000
92	247 500	940 000	135	22 500	280 000
111	192 500	465 000	155	12 500	170 000
135	65 000	250 000	160	12 700	163 000
155	63 500	135 000	184	10 500	105 000
160	56 000	187 000	202	10 800	70 000
184	29 600	102 000	250	3 830	17 800
202	28 400	43 300	300	3 010	11 500
250	8 800	9 000	350	2 720	5 830
300	4 200	2 700	400	2 750	3 700
350	1 560	1 650	495	1 100	1 220
400	870	1 050	1000	36	6
495	375	200			
1000	120	2			
Nr02			Nr03		
Tid från tillsats	Test 2: x174	Test 2: MS-2	Tid från tillsats	Test 2: x174	Test 2: MS-2
h	ant/ml	ant/ml	h	ant/ml	ant/ml
-12	290	1	-12	142	1
11	130	0,6	7	92	0,4
20	24	0,2	11	142	13
25	165 000	3 500 000	13	67	48
30	540 000	5 750 000	14	24	7
32	382 000	5 975 000	15	900	3
34	400 000	4 375 000	16	6 000	82 500
37	234 000	3 475 000	17	62 000	1 150 000
40	242 000	3 175 000	18	292 000	5 750 000
42	152 000	3 475 000	19	800 000	10 000 000

Forts. på tabell					
Nr02			Nr03		
Tid från tillsats	Test 2: x174	Test 2: MS-2	Tid från tillsats	Test 2: x174	Test 2: MS-2
h	ant/ml	ant/ml	h	ant/ml	ant/ml
45	137 500	2 725 000	20	920 000	7 750 000
57	77 500	1 900 000	21	907 000	9 500 000
60	120 000	1 400 000	22	667 000	5 250 000
68	170 000	875 000	23	511 000	3 567 000
82	140 000	675 000	25	344 000	2 683 000
92	62 000	445 000	30	159 900	1 383 000
111	45 000	222 500	34	133 300	600 000
135	31 000	145 000	40	115 000	508 000
155	25 300	82 500	60	98 300	445 000
202	11 700	26 700	82	65 000	183 000
250	3 580	9 500	111	21 500	102 500
300	3 250	2 700	155	7 500	60 000
400	2 250	1 050	202	5 200	60 000
495	416	250	250	2 000	10 000
1000	44	7	495	149	470
			1000	58	15
Nr04			Forts. på Nr04		
Tid från tillsats	Test 2: x174	Test 2: MS-2	Tid från tillsats	Test 2: x174	Test 2: MS-2
h	ant/ml	ant/ml	h	ant/ml	ant/ml
-12	48	1	250	1 270	2 700
4	58	0,1	495	549	185
7	43	0,2	1000	25	18
8	47	20			
9	25	17			
11	22 500	20			
12	225 000	25			
13	202 000	550 000			
14	1 260 000	9 000 000			
15	1 620 000	15 333 000			
16	1 600 000	11 000 000			
18	1 389 000	10 500 000			
20	1 107 000	14 000 000			
22	920 000	7 500 000			
25	640 000	4 750 000			
30	256 000	2 550 000			
30	184 000	2 500 000			
40	148 000	825 000			
60	72 000	670 000			
82	118 000	355 000			
155	7 000	62 500			
202	2 100	25 700			

Bilaga B:3 Bakteriofagkoncentrationer under tillsatsexperiment 3

Lackarebäcks provnr		datum	antal 174 per mL	antal MS-2 per mL
P0500146-00	Nr 00	22-apr	19,6	<0,1
P0500146-01		22	17,6	<0,1
P0500146-02		22	19,5	<0,1
P0500146-03		22	12,8	0,11
P0500146-99		03-maj	35,7	0,41
P0500146-05		6	52,3	0,75
P0500146-06		9	54,0	0,45
P0500146-07		10	119	0,33
P0500146-09		13	103	0,72
P0500146-15		17	160	1,12
P0500146-23		20	70,2	<0,1
P0500146-27		23	15,3	<0,1
P0500146-28		24	70,2	6 500
P0500146-29		24	40,1	19 500
P0500146-30		25	70,4	116 000
P0500146-31		25	29,6	133 000
P0500146-32		26	430	233 000
P0500146-33		26	508	283 000
P0500146-34		27	2 500	350 000
P0500146-35		27	5 800	1 210 000
P0500146-36		28	8 500	1 310 000
P0500146-38		29	10 500	852 000
P0500146-39		29	11 500	1 690 000
P0500146-40		30	12 800	1 490 000
P0500146-41		30	11 000	1 610 000
P0500146-42		31	40 000	1 450 000
P0500146-43		31	58 000	2 050 000
P0500146-44		01-jun	72 000	698 000
P0500146-46		3	25 500	1 030 000
P0500146-47		7	890	31 000
P0500146-48		10	114	470
P0500146-49		13	116	202
P0500146-50		17	10,2	30,2
P0500146-51		22	10,2	6,77
P0500146-52		28	1,95	3,33
P0500188-00		29	0,44	<0,1
P0500295-01		01-jul	0,75	0,40

Lackarebäcks provnr		datum	antal 174 per mL	antal MS-2 per mL
P0500147-00	Nr 01	22-apr	8,67	<0,1
P0500147-01		22	7,67	<0,1
P0500147-02		22	3,00	0,13
P0500147-03		22	<0,5	<0,1
P0500147-99		03-maj	<0,2	<0,1
P0500147-04		4	0,14	0,21
P0500147-05		6	0,79	<0,06
P0500147-06		9	0,40	0,12
P0500147-07		10	0,70	0,12
P0500147-09		13	0,79	0,12
P0500147-15		16	32,6	0,53
P0500147-23		20	14,3	<0,1
P0500147-27		23	5,67	<0,1
P0500147-28		24	10,0	<0,1
P0500147-29		24	1,23	<0,1
P0500147-30		25	0,65	<0,1
P0500147-31		25	0,92	<0,1
P0500147-32		26	0,85	<0,1
P0500147-33		26	0,10	205
P0500147-34		27	0,05	40,3
P0500147-35		27	<0,05	50,3
P0500147-36		28	0,75	19,7
P0500147-38		29	0,05	50,3
P0500147-39		29	<0,05	30,3
P0500147-40		30	0,05	15
P0500147-41		30	0,15	70
P0500147-42		31	<0,05	230
P0500147-43		31	0,42	3 300
P0500147-44		01-jun	39,3	14 500
P0500147-45		2	56,3	4 020
P0500147-46		3	63,3	1 720
P0500147-47		7	18,3	145
P0500147-48		10	4,75	10,3
P0500147-49		13	4,33	40,0
P0500147-50		17	0,75	1,33
P0500147-51		22	1,33	1,00
P0500147-52		28	0,55	0,95
P0500189-00		29	0,66	0,05
P0500196-01		01-jul	0,67	<0,05
P0500148-00	Nr 02	22-apr	13,10	<0,1
P0500148-01		22	4,75	<0,1
P0500148-02		22	2,95	<0,1

Lackarebäcks provnr	datum	antal 174 per mL	antal MS-2 per mL
P0500148-03	22	1,67	<0,1
P0500148-99	03-maj	0,67	0,33
P0500148-04	4	1,22	<0,06
P0500148-05	6	0,76	0,30
P0500148-06	9	1,72	1,20
P0500148-07	10	1,47	0,90
P0500148-09	13	0,67	1,80
P0500148-15	16	22,4	1,90
P0500148-23	20	6,33	<0,07
P0500148-27	23	1,00	<0,06
P0500148-28	24	0,37	0,17
P0500148-29	24	0,33	8,67
P0500148-30	25	< 0,1	655
P0500148-31	25	0,67	497
P0500148-32	26	0,67	80
P0500148-33	26	0,05	8 810
P0500148-34	27	0,05	14 300
P0500148-35	27	0,15	25 400
P0500148-36	28	0,63	81 700
P0500148-39	29	0,57	73 300
P0500148-40	29	1,33	69 100
P0500148-41	30	0,27	22 500
P0500148-42	30	0,37	64 200
P0500148-43	31	0,67	58 100
P0500148-44	31	655	30 500
P0500148-45	01-jun	275	5 550
P0500148-46	2	42,3	1 710
P0500148-47	3	12,3	444
P0500148-48	7	1,33	20,3
P0500148-49	10	0,77	10,3
P0500148-50	13	0,67	4 367,0
P0500148-51	17	0,57	2,67
P0500148-52	22	0,15	1,03
P0500148-53	28	0,95	1,03
P0500190-00	29	< 0,1	<0,04
P0500197-01	01-jul	< 0,1	<0,04
P0500149-00	Nr 03 22-apr	18,3	0,1
P0500149-01	22	24,3	0,6
P0500149-02	22	2,67	0,9
P0500149-03	22	1,67	<0,1
P0500149-99	03-maj	2,67	<0,1
P0500149-04	4	2,67	0,1

Lackarebäcks provnr	datum	antal 174 per mL	antal MS-2 per mL
P0500149-05	6	2,43	0,4
P0500149-06	9	2,47	<0,08
P0500149-07	10	2,13	0,3
P0500149-09	13	11,67	0,5
P0500149-15	16	15,3	0,5
P0500149-23	20	5,67	<0,07
P0500149-27	23	1,95	<0,07
P0500149-28	24	0,95	2,67
P0500149-29	24	0,67	113
P0500149-30	25	0,67	1 750
P0500149-31	25	< 0,1	1 350
P0500149-32	26	0,67	145
P0500149-33	26	26,3	8 540
P0500149-34	27	3,33	13 400
P0500149-35	27	2,33	5 800
P0500149-36	28	1,47	22 300
P0500149-38	29	2,33	12 300
P0500149-39	29	1,33	5 500
P0500149-40	30	0,67	20 400
P0500149-41	30	3,33	58 100
P0500149-42	31	52,3	76 700
P0500149-43	31	1 220	36 700
P0500149-44	01-jun	29,67	3 210
P0500149-45	2	50,3	1 810
P0500149-46	3	26,3	713
P0500149-47	7	2,33	713
P0500149-48	10	2,67	26,3
P0500149-49	13	1,67	16,7
P0500149-50	17	0,85	0,85
P0500149-51	22	0,60	0,63
P0500149-52	28	0,90	0,87
P0500191-00	29	< 0,1	<0,2
P0500198-01	01-jul	< 0,1	<0,2
P0500150-00	Nr 04 22-apr	16,3	<0,1
P0500150-01	22	10,3	<0,1
P0500150-02	22	0,67	0,67
P0500150-03	22	0,37	0,57
P0500150-99	03-maj	0,27	0,13
P0500150-04	4	1,73	0,13
P0500150-05	6	1,63	0,95
P0500150-06	9	2,47	2,33
P0500150-07	10	2,13	0,93

Lackarebäcks provnr	datum	antal 174 per mL	antal MS-2 per mL
P0500150-09	13	0,43	0,43
P0500150-15	16	3,67	1,73
P0500150-23	20	4,33	<0,1
P0500150-27	23	2,33	<0,1
P0500150-28	24	0,13	50,0
P0500150-29	24	< 0,1	1 180
P0500150-30	25	0,67	3 350
P0500150-31	25	0,38	1 670
P0500150-32	26	0,23	531
P0500150-33	26	55,3	255 000
P0500150-34	27	45,3	135 000
P0500150-35	27	60,3	113 000
P0500150-36	28	90,0	127 000
P0500150-39	29	99,0	76 700
P0500150-40	29	110	385 000
P0500150-41	30	30	96 700
P0500150-42	30	5 510	138 000
P0500150-43	31	11 200	50 500
P0500150-44	31	5 500	713
P0500150-45	01-jun	605	1 510
P0500150-46	2	40,3	333
P0500150-48	3	5,67	18,3
P0500150-49	7	5,67	8,33
P0500150-50	10	5,67	6,33
P0500150-51	13	5,67	4,67
P0500150-52	17	1,67	1,67
P0500150-53	22	2,33	1,40
P0500150-54	28	2,33	0,53
P0500192-00	29	< 0,1	0,05
P0500199-01	01-jul	0,13	<0,05
P0500151-00	Nr 05	22	<0,05
P0500151-01		25	<0,05
P0500151-02		25	<0,05
P0500151-03		25	<0,05
P0500151-27	24-maj	< 0,1	<0,05
P0500151-28	24	< 0,1	<0,05
P0500151-29	25	< 0,1	<0,05
P0500151-30	25	0,06	<0,1
P0500151-31	26	utgår	utgår
P0500151-32	26	<0,04	<0,05
P0500151-33	27	<0,04	<0,05
P0500151-34	27	0,12	<0,05
P0500151-35	28	0,04	<0,05

Lackarebäcks provnr	datum	antal 174 per mL	antal MS-2 per mL
P0500151-37	29	<0,04	<0,05
P0500151-38	29	0,08	<0,05
P0500151-39	30	0,04	<0,05
P0500151-40	30	<0,04	<0,03
P0500151-41	31	<0,04	0,06
P0500151-42	31	0,15	3,63
P0500151-43	01-jun	0,5	16,3
P0500151-44	2	0,2	13,3
P0500151-45	3	<0,04	3,67
P0500151-46	7	<0,04	2,67
P0500151-47	10	<0,03	10,3
P0500151-48	13	<0,03	15,3
P0500151-49	17	0,20	22,3
P0500151-50	22	0,25	36,7
P0500151-51	28	0,15	21,7
P0500193-00	29	0,13	0,33
P0500200-01	01-jul	0,13	1,33
P0500152-00	Nr 06 25	<0,05	<0,05
P0500152-01	25	<0,05	<0,05
P0500152-02	25	<0,05	<0,05
P0500152-03	25	<0,05	<0,05
P0500152-28	24-maj	< 0,08	<0,1
P0500152-29	24	< 0,1	<0,1
P0500152-30	25	< 0,1	<0,1
P0500152-31	25	0,17	<0,1
P0500152-32	26	< 0,08	<0,1
P0500152-33	26	< 0,1	<0,1
P0500152-34	27	< 0,1	<0,1
P0500152-35	27	< 0,1	<0,1
P0500152-36	28	< 0,1	<0,1
P0500152-38	29	< 0,1	<0,1
P0500152-39	29	< 0,1	<0,1
P0500152-40	30	< 0,1	<0,1
P0500152-41	30	< 0,1	<0,05
P0500152-42	31	< 0,1	<0,05
P0500152-43	31	<0,05	<0,05
P0500152-44	01-jun	<0,05	<0,05
P0500152-45	2	<0,05	<0,05
P0500152-46	3	<0,04	<0,05
P0500152-47	7	<0,04	<0,05
P0500152-48	10	<0,03	<0,05
P0500152-49	13	<0,03	<0,05
P0500152-50	17	<0,03	<0,05

Lackarebäck's			antal 174	antal MS-2
provnr		datum	per mL	per mL
P0500152-51		22	<0,03	<0,05
P0500152-52		28	<0,03	<0,05
P0500194-00		29	<0,03	<0,05
P0500201-01		01-jul	<0,03	<0,05
P0500153-00	pilot rå	25	<0,05	<0,05
P0500153-01	pilot rå	25	<0,05	<0,05
P0500153-02	rå+mix1	25	<0,05	<0,05
P0500153-03	rå+mix1	25	<0,05	<0,05
P0500153-12	råv+mix	23-maj	381 000	2 080 000
P0500153-13	råv+mix	24	371 000	2 120 000
P0500153-14	råv+mix	25	653 000	3 630 000
P0500153-15	råv+mix	26	701 000	2 920 000
P0500153-16	råv+mix	27	251 000	1 280 000
P0500153-17	råv+mix	27	253 000	561 000
P0500153-18	råv+mix	28	153 000	258 000
P0500153-19	råv+mix	29	149 000	64 300
P0500153-20	råv+mix	29	148 000	1 040 000
P0500153-21	råv+mix	30	251 000	168 000
P0500154-03	råv+mix	31	125 000	363
P0500154-04	råv+mix	07-jun	45,3	74,5
P0500154-05	råv+mix	13	3,67	7,67
P0500154-06	råv+mix	22	0,45	0,95
P0500154-07	råv+mix	28	0,35	0,57
		2/6	13 300	32 400
Ursprungslösning				

	174	MS-2
22-maj	5×10^7	$2,1 \times 10^9$
24-maj	5×10^7	
25-maj	6×10^7	
26-maj	3×10^7	
27-maj	2×10^7	
31-maj	$2,7 \times 10^8$	
02-jun	$2,7 \times 10^8$	
06-jun	2×10^7	
08-jun	$5,7 \times 10^7$	$2,5 \times 10^9$
13-jun	$4,1 \times 10^7$	$2,4 \times 10^9$
04-jul	$5,1 \times 10^7$	$2,1 \times 10^9$
15-jul		$2,8 \times 10^9$
18-jul	$2,9 \times 10^7$	$2,3 \times 10^9$

Bilaga C:1 Tabell med statistik under perioder när inga tillsatsexperiment genomfördes: råvatten

		Pilotanläggningens råvatten 2004-06-14 till 2005-07-15							Lackarebäckens råvatten för jämförelse med Olivinkolonnerna K5 och K6 2005-04-01 till 2005-09-30							Lackarebäckens råvatten för jämförelse med omättad zon K0-K4 2004-03-01 till 2005-09-30						
		Max	Min	Median	Medel	Antal prov	Standardavvikelse	Standardavvikelse	Max	Min	Median	Medel	Antal prov	Standardavvikelse	Standardavvikelse	Max	Min	Median	Medel	Antal prov	Standardavvikelse	Standardavvikelse
Provtemp	°C	20,5	2,9	15,1	12,3	39	57%	7,0	19,4	3,8	15,3	13,8	82	35%	4,8	19,4	2,5	12,9	11,2	305	53%	5,9
Turb	FNU	1,90	0,68	0,83	1,00	20	35%	0,35	2,00	0,68	0,88	1,02	79	34%	0,34	2,00	0,63	0,87	0,95	248	25%	0,24
pH Per.2		7,4	6,8	7,1	7,1	21	2%	0,1	7,3	6,9	7,1	7,1	79	1%	0,1	7,4	6,7	7,1	7,1	249	2%	0,1
pH Per.1																7,1	6,8	7,0	7,0	29	1%	0,1
COD:Mn Per.2	mg/l	6,8	3,9	4,8	5,1	10	20%	1,0	6,0	4,0	4,0	4,5	26	14%	0,6	7,0	4,0	5,0	4,9	83	16%	0,8
COD:Mn Per.1	mg/l															6,0	5,0	6,0	5,7	10	8%	0,5
Kond Per.2	mS/m	11,5	10,5	11,3	11,2	21	2%	0,3	11,2	10,5	10,7	10,7	26	2%	0,2	12,8	10,2	11,3	11,3	83	5%	0,5
Kond Per.1	mS/m															11,7	10,7	11,3	11,2	10	3%	0,4
Ca	mg/l	7,8	6,3	7,0	7,0	16	6%	0,4	8,0	6,8	7,3	7,4	12	5%	0,4	8,0	6,4	7,0	7,0	38	6%	0,4
Mg	mg/l	1,8	1,6	1,7	1,7	16	4%	0,1	1,9	1,6	1,8	1,7	12	6%	0,1	1,9	1,5	1,8	1,7	38	6%	0,1
Na	mg/l	12,0	9,8	11,0	10,9	19	4%	0,5	11,0	10,0	11,0	10,6	12	5%	0,5	13,0	10,0	11,0	11,1	38	7%	0,7
K	mg/l	1,8	1,3	1,3	1,4	16	9%	0,1	1,4	1,2	1,3	1,3	12	5%	0,1	1,4	1,2	1,3	1,3	38	4%	0,1
Fe	mg/l	0,09	0,00	0,03	0,04	19	80%	0,03	0,15	0,03	0,06	0,07	12	55%	0,04	0,16	0,03	0,07	0,08	38	47%	0,04
Mn	mg/l	0,005	0,000	0,003	0,003	19	44%	0,001	0,019	0,006	0,014	0,014	12	38%	0,005	0,034	0,006	0,013	0,014	38	42%	0,006
Al	mg/l	0,071	0,009	0,024	0,031	19	69%	0,021	0,160	0,026	0,053	0,068	12	67%	0,045	0,160	0,026	0,055	0,062	38	53%	0,033
Alk Per.2	mmol/l	0,34	0,21	0,29	0,28	16	11%	0,03	0,34	0,25	0,29	0,29	26	11%	0,03	0,34	0,24	0,29	0,29	83	9%	0,03
Alk Per.1	mmol/l															0,25	0,24	0,25	0,25	10	2%	0,00
Fluorid	mg/l	0,10	0,08	0,09	0,09	8	9%	0,01	0,10	0,00	0,05	0,05	6	110%	0,05	0,10	0,00	0,00	0,04	20	126%	0,05
Klorid	mg/l	19	12	16	16	19	14%	2	16	12	14	14	6	11%	1	19	12	15	15	19	12%	2
Sulfat	mg/l	10,8	6,2	9,5	9,3	14	16%	1,5	11,0	9,0	9,5	9,7	6	8%	0,8	11,0	7,0	10,0	9,8	19	11%	1,0
Ammoniumkväve	µg/l	21	5	12	12	5	60%	7	20	10	10	12	26	31%	4	28	10	10	14	51	38%	5
Nitritkväve	µg/l	3	0	1	1	10	80%	1	2	0	1	1	26	53%	1	3	0	1	1	83	62%	1
Nitrat+Nitrit Kväve	µg/l	560	240	320	339	9	29%	98	420	230	345	331	26	20%	67	480	230	360	346	83	19%	66
Total kväve	µg/l	670	480	570	570	9	11%	61	660	500	595	585	6	11%	64	660	470	610	583	19	11%	62
Fosfor	µg/l	12	3	7	7	10	43%	3	7	3	5	5	6	39%	2	8	3	5	5	19	46%	2
UV254nm Per. 2	ae/cm	0,192	0,092	0,127	0,140	20	22%	0,031	0,181	0,099	0,116	0,124	26	20%	0,024	0,192	0,099	0,134	0,138	83	21%	0,029
UV254nm Per. 1	ae/cm															0,192	0,156	0,182	0,176	10	8%	0,014
TOC	mg/l	5,5	4,0	4,8	4,8	9	11%	0,5	5,7	4,0	4,1	4,4	6	15%	0,7	5,7	2,8	4,2	4,4	19	17%	0,7
COD/TOC		1,2	1,0	1,0	1,1				1,1	1,0	1,0	1,0				1,2	1,4	1,2	1,1			
UV254/TOC	l/mg.m	3,5	2,3	2,6	2,9				3,2	2,5	2,9	2,9				3,4	3,5	3,2	3,2			
Mikroorg	CFU/ml	27000	57	940	3575	13	206%	7371	270	8	64	89	79	81%	72	1100	6	82	99	249	93%	93
Heterotrofer	CFU/ml	32000	92	500	4459	13	195%	8716	340	7	100	125	79	67%	84	2500	0	110	159	243	138%	218
Koliformer	ant/100ml	1700	2	24	247	9	224%	553	4600	0	46	433	82	193%	835	4600	0	16	269	255	242%	651
E.coli	ant/100ml	1	0	0	0	9	150%	1	6	0	0	1	82	191%	1	10	0	0	1	255	199%	1
Enterokocker	CFU/100 ml	2	0	1	1	8	119%	1	4	0	0	1	12	173%	1	5	0	0	1	38	178%	1
Cl.perfr.	CFU/100 ml	11	0	1	2	9	156%	3	77	0	1	2	77	428%	9	77	0	1	2	236	333%	5
Mögelsvamp	CFU/100 ml	700	11	150	265	9	95%	252	300	9	73	94	27	79%	74	800	7	91	145	92	119%	173
ATP	pg/0.1 ml	11,2	3,4	5,3	6,3	19	42%	2,6														
Fluor.Part. 0,4-1um	ant/ml	26000	5440	8750	9716	17	48%	4677	49900	3100	11900	16095	80	75%	12062	49900	1530	7340	10671	236	83%	8861
Fluor.Part.1-15um	ant/ml	10700	1560	3400	3613	17	60%	2175	10800	1550	4285	4910	80	47%	2314	10800	40	3490	3894	236	58%	2253

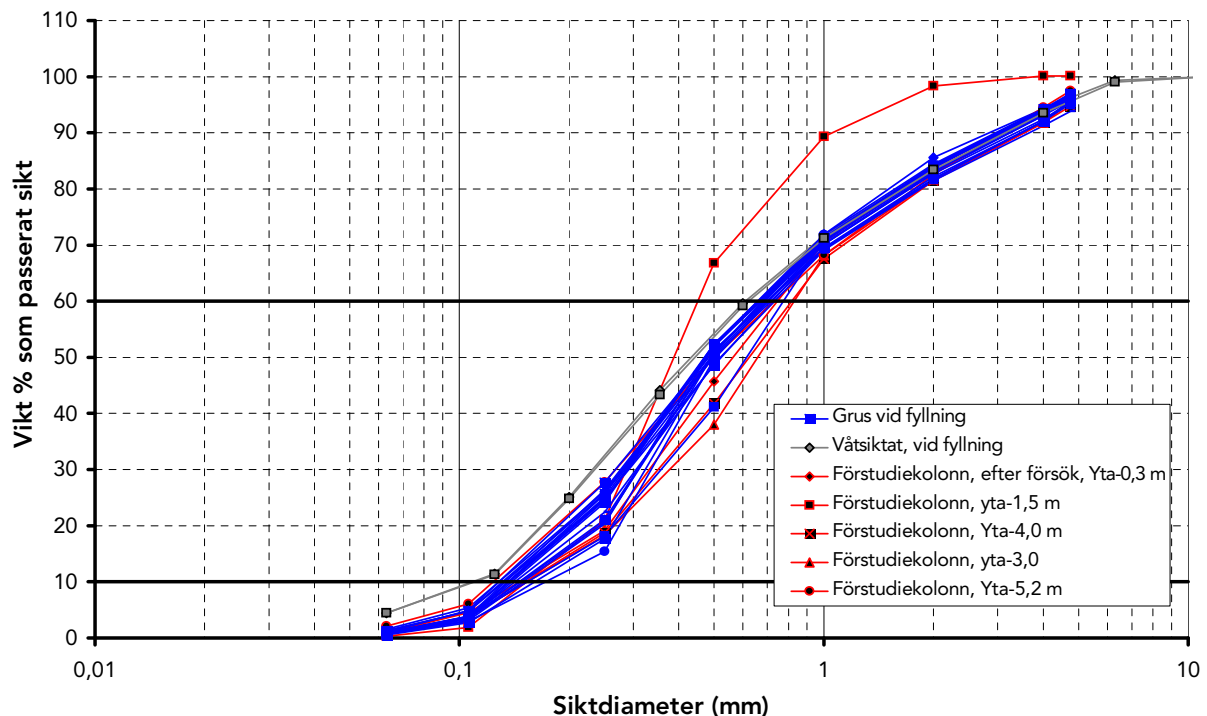
Bilaga C:2 Tabell med statistik under perioder när inga tillsatsexperiment genomfördes: K0-K4

		2 m omåttad zon (K3) 2004-05-08 till 2005-08-24 exklusive försöksperioder							2 m omåttad zon (K2) 2004-06-08 till 2005-08-24 exklusive försöksperioder							4 m omåttad zon (K1) 2004-06-08 till 2005-08-24 exklusive försöksperioder																						
		Standardavvikelse	Standavvik/medel	Antal prov	Medel	Median	Min	Max	Standardavvikelse	Standavvik/medel	Antal prov	Medel	Median	Min	Max	Standardavvikelse	Standavvik/medel	Antal prov	Medel	Median	Min	Max																
1 m omåttad zon (K4) 2004-06-08 till 2005-08-24 exklusive försöksperioder	Proxtemp	°C	22,1	15,4	20,0	19,2	26	11%	2,0	18,33	110,00	31,00	56,50	59,85	20	31%	18,33	187,00	15,30	73,00	81,90	26	11%	2,1	22,1	14,3	19,0	18,9	26	11%	2,1	22,0	15,4	20,0	19,2	25	10%	1,9
	FNU		105,00	12,00	63,00	60,41	20	41%	24,79	7,2	6,5	6,9	6,9	26	2%	0,2	7,1	6,5	6,9	6,9	26	3%	0,2	7,0	6,3	6,8	6,8	26	3%	0,2	7,1	6,6	6,8	6,8	25	3%	0,2	
	pH Per.2		7,0	6,5	6,8	6,8		219%	0,1	7,0	6,6	6,8	6,8		177%	0,1	7,0	6,7	6,9	6,9		146%	0,1	7,0	6,5	6,8	6,8		231%	0,2	7,0	6,6	6,9	6,8		161%	0,1	
	pH Per.1		4,9	2,3	2,8	3,2	11	26%	0,8	4,8	2,2	2,5	2,9	11	28%	0,8	5,0	2,1	2,5	2,9	11	34%	1,0	2,6	1,1	1,8	1,9	11	23%	0,4	3,3	2,4	2,7	2,8	10	16%	0,5	
	COD-Mn Per.2	mg/l	2,8	1,6	2,3	2,3		1517%	0,3	2,7	1,4	2,2	2,1		1637%	0,4	2,4	1,5	2,3	2,1		1531%	0,3	2,5	1,3	2,2	2,1		2217%	0,5	2,3	1,4	2,4	2,4		1336%	0,5	
	COD-Mn Per.1	mg/l	11,7	10,3	11,4	11,2	26	3%	0,4	12,7	9,8	11,4	11,2	26	5%	0,5	11,8	9,7	11,4	11,2	26	5%	0,5	11,7	9,4	11,2	10,9	26	6%	0,7	12,2	10,1	11,3	11,2	25	5%	0,6	
	Kond Per.2	mS/m	12,1	11,5	11,8	11,8		134%	0,2	14,0	11,5	11,7	11,9		657%	0,3	21,0	11,6	12,0	13,0		2318%	3,0	12,3	11,2	11,7	11,7		272%	0,3	12,4	11,7	12,0	12,0		167%	0,2	
	Kond Per.1	mS/m	7,6	6,1	6,7	6,8	12	6%	0,4	7,2	5,5	6,4	6,4	12	7%	0,5	7,2	5,4	6,4	6,4	12	8%	0,5	6,3	4,8	5,6	5,6	12	8%	0,5	6,9	4,5	6,3	6,2	11	11%	0,7	
	Ca	mg/l	1,8	1,5	1,7	1,7	12	6%	0,1	2,0	1,4	1,7	1,7	12	11%	0,2	2,0	1,3	1,7	1,7	12	12%	0,2	2,3	1,4	1,8	1,8	12	18%	0,3	2,0	1,4	1,6	1,7	11	11%	0,2	
	Mg	mg/l	12,0	9,6	11,0	10,8	16	5%	0,6	11,0	10,0	11,0	10,5	15	5%	0,5	12,0	10,0	11,0	10,7	16	6%	0,5	11,0	9,8	11,0	10,7	16	5%	0,5	12,0	9,5	11,0	10,6	15	6%	0,7	
Na	mg/l	2,2	1,3	1,5	1,7	12	15%	0,3	2,1	1,5	1,7	1,7	12	12%	0,2	2,1	1,4	1,8	1,8	12	13%	0,2	2,6	1,7	1,9	2,0	12	15%	0,3	2,1	1,4	1,8	1,8	11	14%	0,2		
K	mg/l	0,12	0,20	0,06	0,05	16	67%	0,04	0,08	0,00	0,04	0,04	16	61%	0,02	0,11	0,00	0,04	0,05	15	65%	0,03	0,02	0,00	0,00	0,01	16	141%	0,01	0,13	0,00	0,04	0,06	15	72%	0,04		
Fe	mg/l	0,005	0,000	0,003	0,003	16	45%	0,001	0,005	0,001	0,002	0,002	16	33%	0,001	0,004	0,001	0,002	0,002	16	33%	0,001	0,003	0,000	0,001	0,001	16	124%	0,001	0,030	0,002	0,004	0,019	15	165%	0,295		
Mn	mg/l	0,160	0,009	0,053	0,035	16	68%	0,044	0,110	0,017	0,043	0,053	16	63%	0,032	0,140	0,011	0,057	0,061	16	63%	0,038	0,032	0,003	0,016	0,017	16	51%	0,009	0,170	0,003	0,042	0,076	15	72%	0,055		
Al	mg/l	0,32	0,24	0,30	0,28	11	11%	0,03	0,32	0,17	0,29	0,27	11	17%	0,05	0,33	0,16	0,29	0,27	11	21%	0,05	0,32	0,15	0,24	0,25	11	24%	0,06	0,33	0,17	0,30	0,28	10	18%	0,05		
Alk Per.2	mmol/l						0,22							0,20							0,23														0,23			
Alk Per.1	mmol/l																																					
Fluorid	mg/l	0,20	0,08	0,10	0,11	9	33%	0,04	0,20	0,09	0,14	0,14	7	32%	0,05	0,15	0,09	0,10	0,11	9	19%	0,02	0,16	0,03	0,12	0,12	7	27%	0,03	0,11	0,06	0,10	0,09	7	17%	0,02		
Klorid	mg/l	19	10	13	15	16	18%	2	20	10	15	15	16	17%	3	21	10	15	15	16	18%	3	19	11	15	15	16	15%	2	19	11	15	15	14	17%	3		
Sulfat	mg/l	11,0	6,6	10,0	9,4	11	16%	1,5	11,0	6,0	10,0	9,3	11	13%	1,7	10,9	7,3	10,4	10,4	11	13%	1,0	11,0	6,4	10,4	9,9	11	14%	1,3	10,9	8,4	10,2	10,1	10	8%	0,8		
Ammoniumkväve	µg/l	36	5	5	10	7	114%	12	20	5	10	11	7	63%	7	12	5	10	8	7	37%	3	12	5	5	7	7	42%	3	360	5	80	124	6	117%	145		
Nitritkväve	µg/l	2	0	1	1	11	76%	1	2	0	1	1	11	83%	1	2	0	1	1	10	69%	1	1	0	0	0	11	171%	0	8	0	2	2	10	95%	2		
Nitrat-Nitr-Kväve	µg/l	530	320	410	416	11	19%	79	630	320	420	443	11	22%	99	670	320	470	456	11	22%	58	730	330	450	464	11	24%	111	830	310	385	429	10	36%	153		
Total kväve	µg/l	810	460	560	566	11	18%	103	920	440	570	614	11	24%	147	920	430	610	625	11	25%	153	900	450	570	605	11	24%	145	1400	430	550	701	10	48%	324		
Fosfor	µg/l	76	14	50	44	11	45%	20	98	9	50	52	11	47%	25	160	7	46	59	11	82%	57	41	8	17	20	11	54%	11	140	26	73	71	10	49%	34		
UV254nm Per.2	ae/cm	0,245	0,076	0,115	0,117	26	28%	0,032	0,128	0,073	0,096	0,098	26	13%	0,016	0,123	0,071	0,099	0,097	26	15%	0,015	0,101	0,047	0,056	0,054	26	25%	0,016	0,142	0,063	0,087	0,093	25	22%	0,020		
UV254nm Per.1	ae/cm	0,125	0,062	0,085	0,083		2669%	0,024	0,102	0,068	0,081	0,078		2334%	0,018	0,105	0,039	0,082	0,081		2674%	0,024	0,138	0,046	0,074	0,079		3523%	0,028	0,143	0,069	0,107	0,104		2547%	0,027		
TOC	mg/l	4,5	2,4	3,1	3,3	11	19%	0,6	4,2	2,0	2,9	3,1	11	23%	0,7	4,6	2,1	2,8	3,1	11	25%	0,8	3,1	1,6	2,3	2,3	11	18%	0,4	3,3	2,2	2,8	2,9	10	16%	0,5		
COD/TOC		1,1	1,1	0,9	1,0				1,1	1,1	0,9	1,0				1,1	1,1	0,9	1,0			0,8	0,7	0,8	0,8				1,0	1,1	0,9	1,0						
UV254/TOC	l/mg.m	5,4	3,2	3,7	3,5				3,0	3,7	3,3	3,2				2,7	3,4	3,5	3,2			3,3	2,9	2,4	2,7				3,7	2,9	3,1	3,2						
Mikroorg	C5-U/ml	15300	47	455	1213	20	270%	3271	13300	20	300	1234	20	233%	2879	20000	65	700	2315	20	208%	4606	2100	10	210	345	20	142%	491	32000	59	1100	4068	18	152%	7702		
Heterotrofer	C5-U/ml	23300	180	670	2506	14	237%	5942	21000	33	770	2553	15	206%	5318	26000	140	960	4197	15	181%	7578	13000	32	350	1916	15	152%	2911	30000	150	1200	7007	13	151%	10556		
Koliformer	and/100ml	10	0	0	1	11	312%	3	0	0	0	0	11	0%	0	0	0	0	0	11	0%	0	0	0	0	11	0%	0	0	0	0	0	10	0%	0			
E.coli	and/100ml	3	0	0	0	11	0%	0	0	0	0	0	11	0%	0	0	0	0	0	11	0%	0	0	0	0	11	0%	0	0	0	0	0	10	0%	0			
Enterokocker	C5-U/100 ml	3	0	0	0	9	0%	0	0	0	0	0	9	0%	0	0	0	0	0	9	0%	0	0	0	0	10	0%	0	0	0	0	0	9	0%	0			
C1peffr:	C5-U/100 ml	10	0	0	1	8	263%	4	10	0	0	1	7	265%	4	2	0	0	0	6	24																	

Bilaga C:3 Tabell med statistik under perioder när inga tillsatsexperiment genomfördes: K5 och K6

		2 m omättad zon med Olivin (K6) 2005-04-01 till 2005-08-24 exklusive försöksperioder							2 m omättad zon med Olivin (K5) 2005-04-01 till 2005-08-24 exklusive försöksperioder						
		Max	Min	Median	Medel	Antal prov	Standardavvikelse	Standardavvikelse	Max	Min	Median	Medel	Antal prov	Standardavvikelse	Standardavvikelse
Provtemp	°C	21,0	16,5	20,0	19,7	6	8%	1,7	21,0	16,5	20,1	19,7	6	8%	1,6
Turb	FNU	3,60	2,40	2,50	2,83	3	23%	0,67	5,30	4,50	4,80	4,87	3	8%	0,40
pH Per.2		7,4	7,2	7,4	7,3	6	1%	0,1	7,6	7,2	7,3	7,3	6	2%	0,1
pH Per.1															
COD:Mn Per.2	mg/l	1,4	0,0	1,1	0,9	4	70%	0,6	1,4	0,0	1,0	0,8	4	71%	0,6
COD:Mn Per.1	mg/l														
Kond Per.2	mS/m	12,5	12,3	12,3	12,3	5	1%	0,1	12,1	11,8	12,0	12,0	5	1%	0,1
Kond Per.1	mS/m														
Ca	mg/l	6,5	5,0	6,3	5,9	3	14%	0,8	5,9	4,7	5,5	5,4	3	11%	0,6
Mg	mg/l	5,3	4,3	5,2	4,9	3	11%	0,6	5,2	4,1	4,9	4,7	3	12%	0,6
Na	mg/l	11,0	10,0	11,0	10,7	3	5%	0,6	11,3	10,0	11,0	10,8	3	6%	0,7
K	mg/l	2,4	2,0	2,4	2,3	3	10%	0,2	2,7	2,0	2,4	2,4	3	15%	0,4
Fe	mg/l	0,01	0,00	0,00	0,00	3	173%	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	3	173%	0,01
Mn	mg/l	0,000	0,000	0,000	0,000	3	0%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3	0%	0,000
Al	mg/l	0,005	0,001	0,003	0,003	3	67%	0,002	0,005	0,002	0,003	0,003	3	46%	0,002
Alk Per.2	mmol/l	0,47	0,41	0,45	0,44	3	7%	0,03	0,42	0,40	0,41	0,41	3	2%	0,01
Alk Per.1	mmol/l														
Fluorid	mg/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0%	0,00
Klorid	mg/l	13	11	13	12	3	9%	1	14	11	13	13	3	12%	2
Sulfat	mg/l	11,5	9,0	11,2	10,6	3	13%	1,4	11,5	10,0	11,0	10,8	3	7%	0,8
Ammoniumkväve	µg/l	10	5	5	7	3	43%	3	5	5	5	5	3	0%	0
Nitritkväve	µg/l	0	0	0	0	3	0%	0	0	0	0	0	3	0%	0
Nitrat+Nitrit Kväve	µg/l	580	390	450	473	3	21%	97	590	380	440	470	3	23%	108
Total kväve	µg/l	650	450	510	537	3	19%	103	640	440	490	523	3	20%	104
Fosfor	µg/l	69	6	12	25	4	120%	30	320	8	13	89	4	174%	154
UV254nm Per. 2	ae/cm	0,026	0,018	0,019	0,020	6	15%	0,003	0,032	0,022	0,024	0,025	6	15%	0,004
UV254nm Per. 1	ae/cm														
TOC	mg/l	1,6	1,0	1,2	1,2	4	21%	0,3	1,5	1,1	1,2	1,3	4	15%	0,2
COD/TOC		0,9	0,0	0,9	0,7				0,9	0,0	0,8	0,7			
UV254/TOC	l/mg,m	1,6	1,8	1,7	1,6				2,1	2,0	2,0	2,0			
Mikroorg	CFU/ml	29000	150	490	9880	3	168%	16559	12000	67	1900	4656	3	138%	6426
Heterotrofer	CFU/ml	53000	600	960	18187	3	166%	30150	16000	250	4600	6950	3	117%	8134
Koliformer	ant/100ml	0	0	0	0	3	0%	0	0	0	0	0	3	0%	0
E.coli	ant/100ml	0	0	0	0	3	0%	0	0	0	0	0	3	0%	0
Enterokocker	CFU/100 ml	0	0	0	0	3	0%	0	0	0	0	0	3	0%	0
Cl.perfr.	CFU/100 ml	0	0	0	0	3	0%	0	0	0	0	0	3	0%	0
Mögelsvamp	CFU/100 ml	760	63	412	412	2	120%	493	8	5	7	7	2	33%	2
ATP	pg/0.1 ml	2,4	0,0	0,5	0,8	4	130%	1,1	1,1	0,0	0,6	0,6	4	82%	0,5
Fluor.Part. 0,4-1µm	ant/ml	2740	1330	2000	2040	5	25%	506	3740	2660	2790	2976	5	15%	436
Fluor.Part.1-15µm	ant/ml	180	70	125	132	5	34%	45	275	75	105	136	5	59%	80

Bilaga D:1 Siktning av materialprov från alla kolonner



Kommentarer:

Gruset fylldes på genom att det hälldes från överkanten ner i röret, vilket innebär att det nedersta materialet föll genom luften ca 6 m och det översta lagret endast 0,5 m.

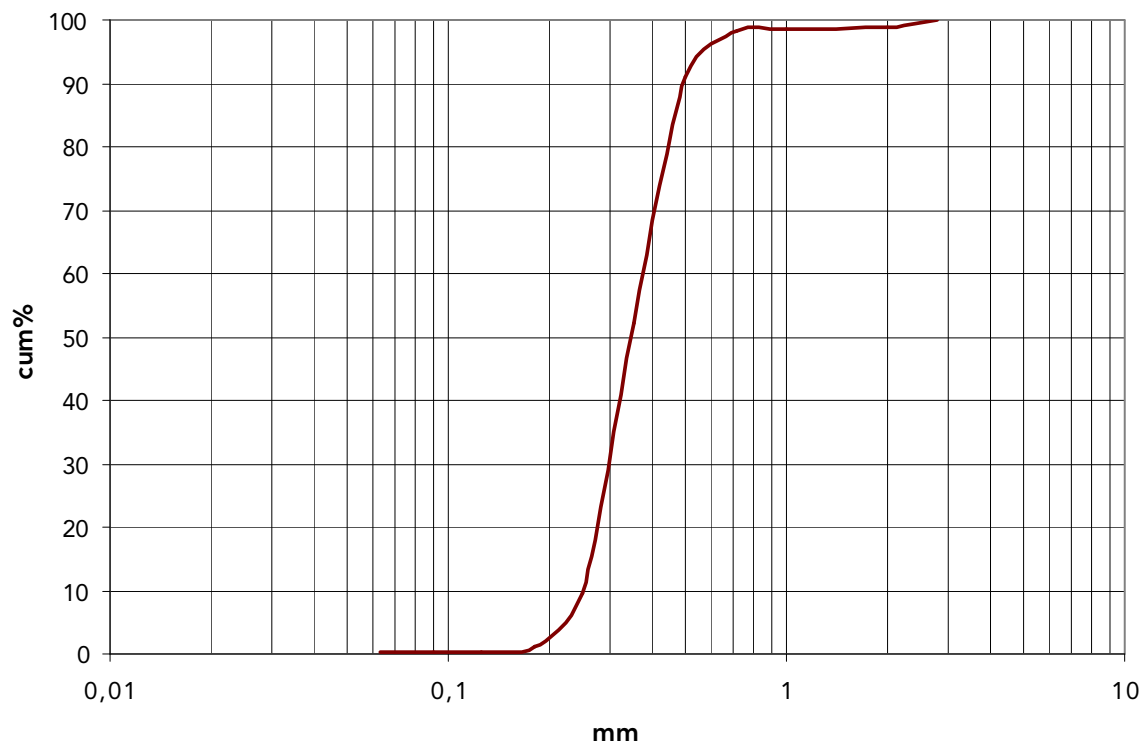
Grus vid påfyllning innebär att proverna togs i materialet innan det fylldes på i kolonnen.

Förstudiekolonnen fylldes på samma vis och ett prov togs även efter experimentet. Storleksfördelningen kan således vara ett resultat av påfyllnaden av vattnet underifrån eller/och fyllnadssättet av materialet i kolonnen.

Ramböll genomförde en våtsiktning för att undersöka vilken påverkan finmaterialet hade på siktningen. Resultatet tyder på att det var ringa.

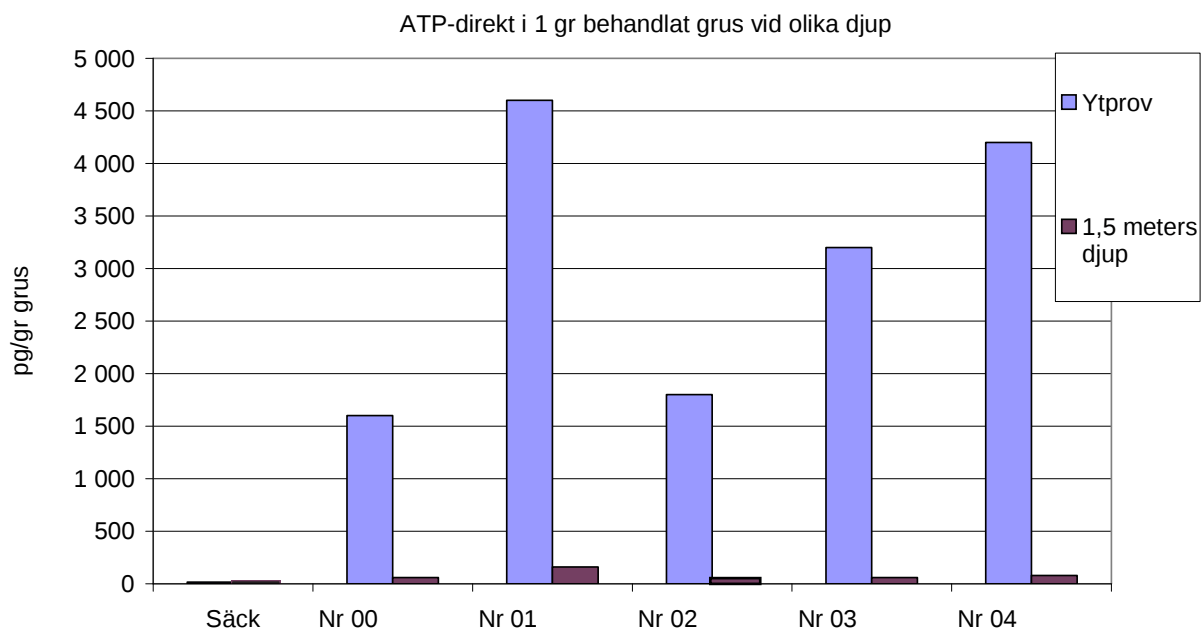
Bilaga D:2 Siktkurva för IOCO-sanden som användes i experimenten (North Cape Minerals AS, Norge)

Typical Sieve Curve - IOCO (Filtersil TOC)

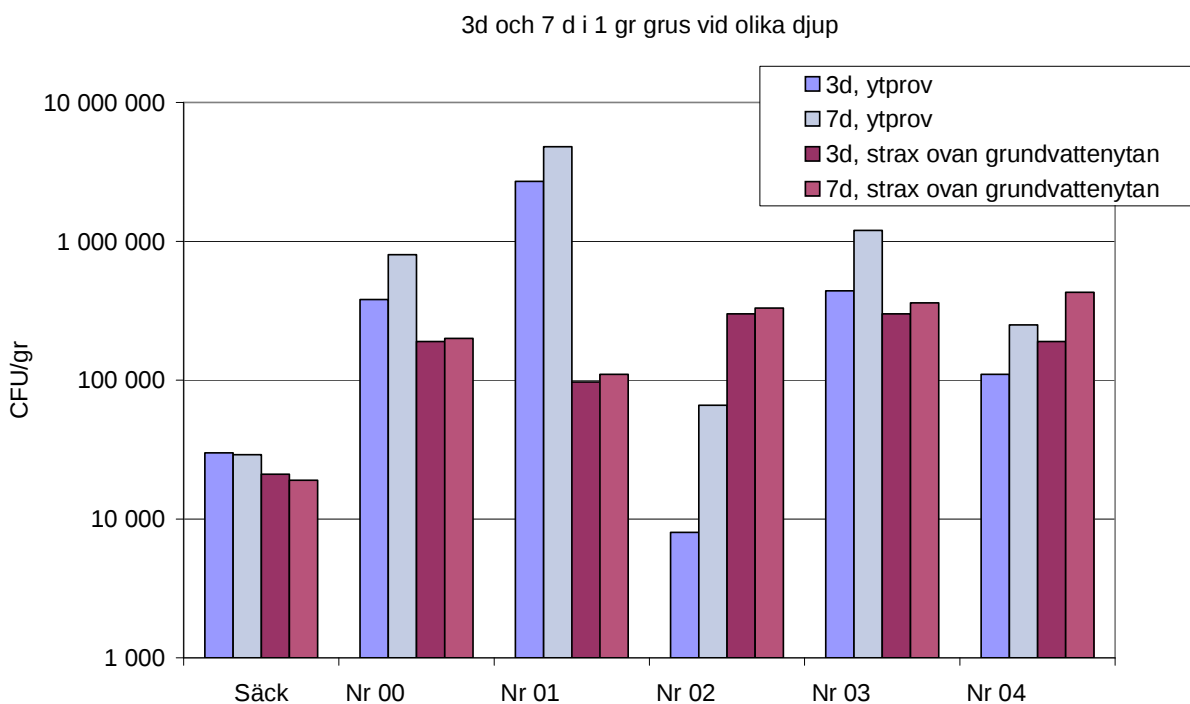


Bilaga E Undersökning av bakterier och organiskt material i Gråbomaterialet under period 1

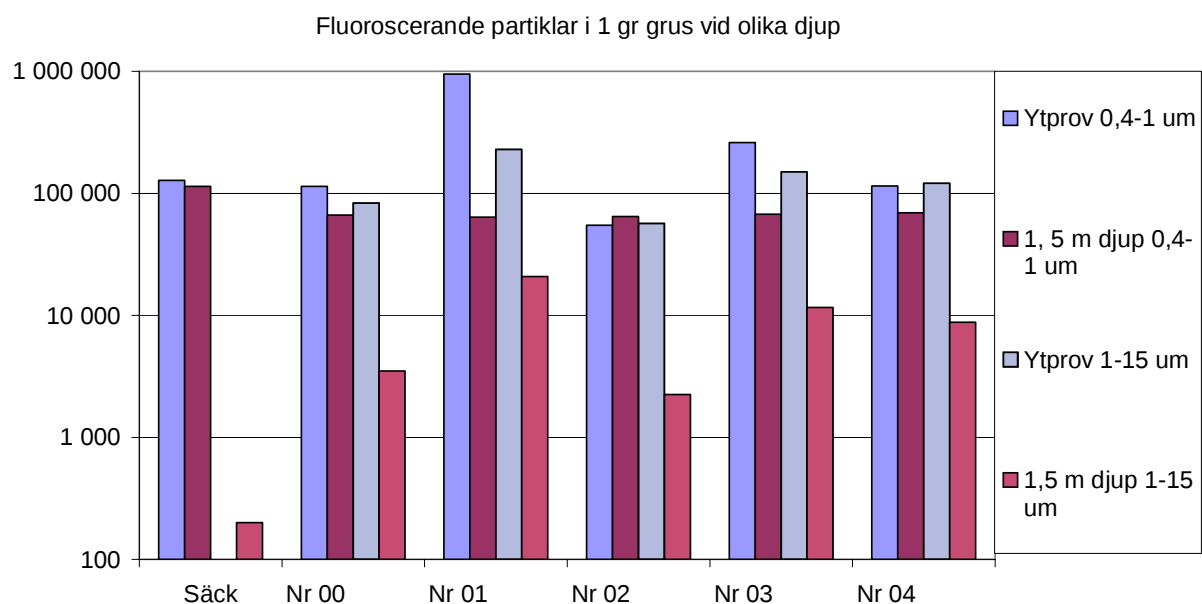
Prov i säck representerar oanvänt grusmaterial.



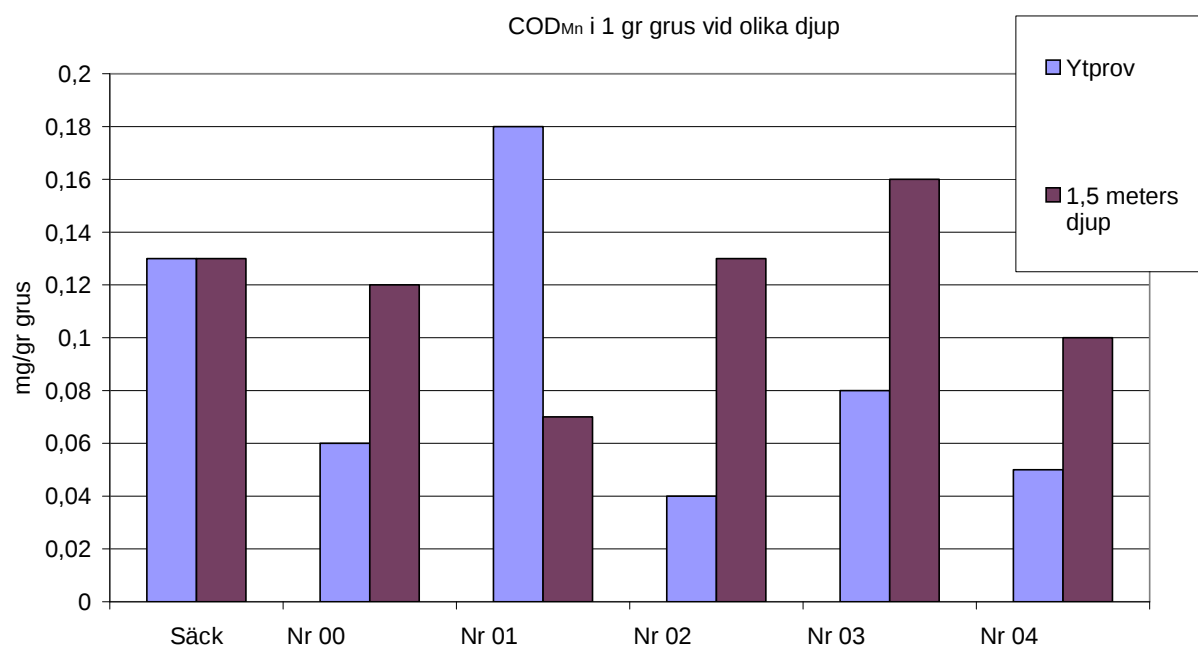
Resultat av analys ATP-direkt i grus från kolonner och säck. Nr 00 är från kolonn K0 o.s.v., säck betecknar oanvänt grus förvarat i försökshallen.



Mikroorganismer 3 d och heterotrofer 7d i grus från kolonnerna.



Fluorescerande partiklar i grus från kolonnerna.



COD_{Mn} i grus under period 1.

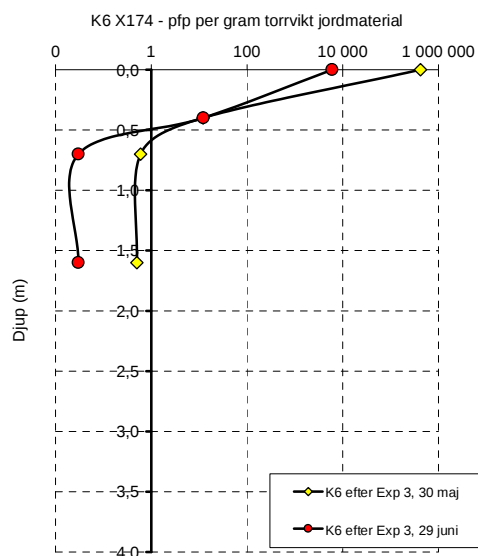
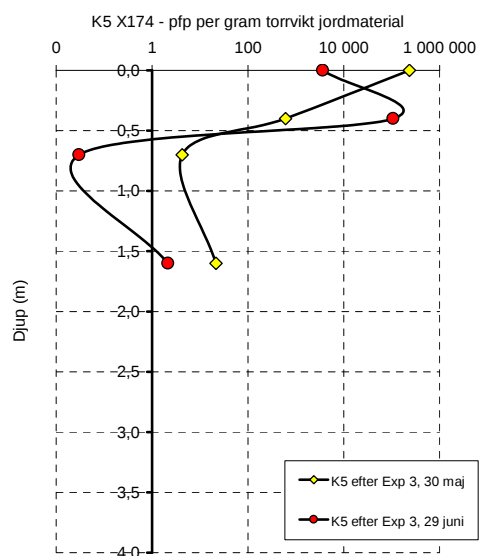
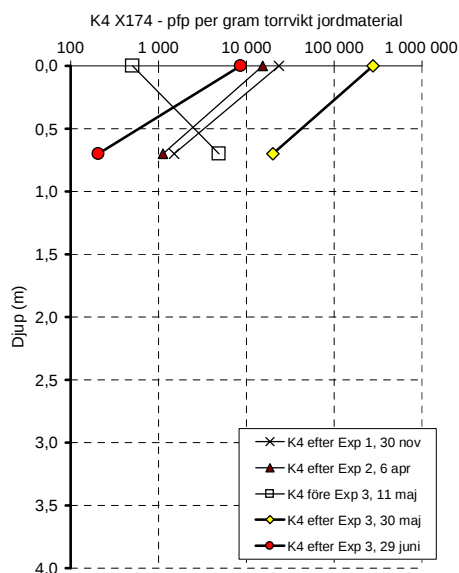
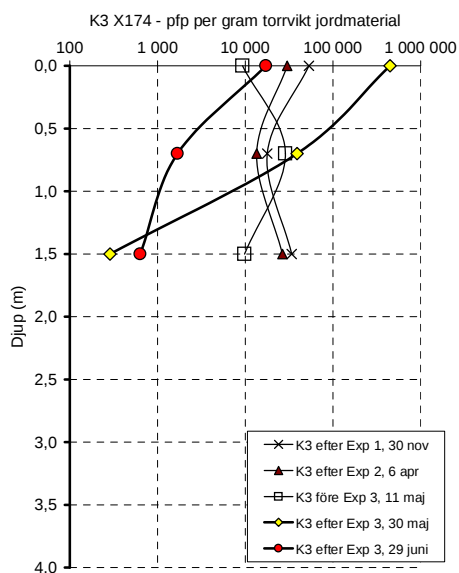
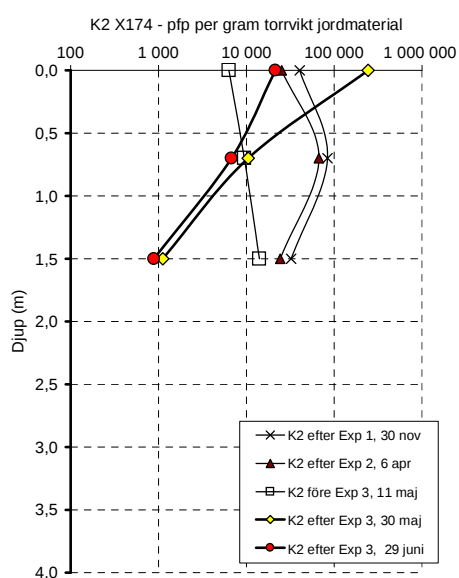
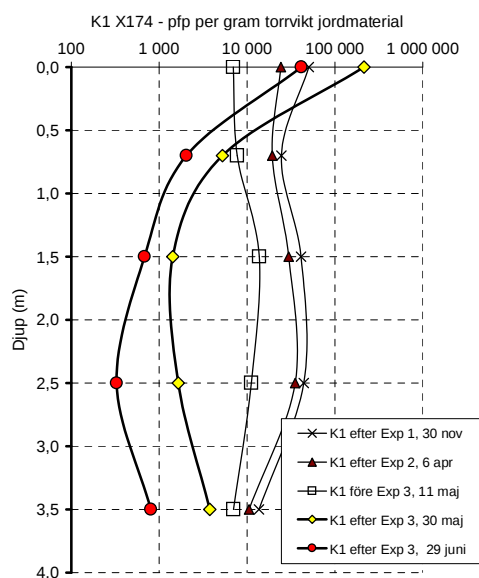
Bilaga F:1 Analysresultat för bakteriofager MS-2 och ΦX174 i kolonnsanden

	Djup antal X174 antal MS-2				Djup antal X174 antal MS-2		
	m	per g dw	per g dw		m	per g dw	per g dw
K0 efter Exp 1, 30 nov	0,0	462 755	2 135 790	K0 efter Exp 2, 6 apr	0,0	228 253	1 053 474
K1 efter Exp 1, 30 nov	0,0	50 413	576 143	K1 efter Exp 2, 6 apr	0,0	24 300	277 709
	0,7	24 576	361		0,7	19 338	284
	1,5	41 096	939		1,5	29 808	681
	2,5	44 160	604		2,5	35 332	483
	3,5	13 679	775		3,5	10 527	597
K2 efter Exp 1, 30 nov	0,0	40 511	291 175	K2 efter Exp 2, 6 apr	0,0	25 277	181 678
	0,7	83 969	1 232		0,7	66 989	983
	1,5	32 267	1 337		1,5	24 297	1 007
K3 efter Exp 1, 30 nov	0,0	53 191	1 649	K3 efter Exp 2, 6 apr	0,0	30 080	932
	0,7	17 777	184		0,7	13 515	140
	1,5	33 803	473		1,5	26 625	373
K4 efter Exp 1, 30 nov	0,0	23 519	235 187	K4 efter Exp 2, 6 apr	0,0	15 349	153 495
	0,7	1 504	208		0,7	1 124	156

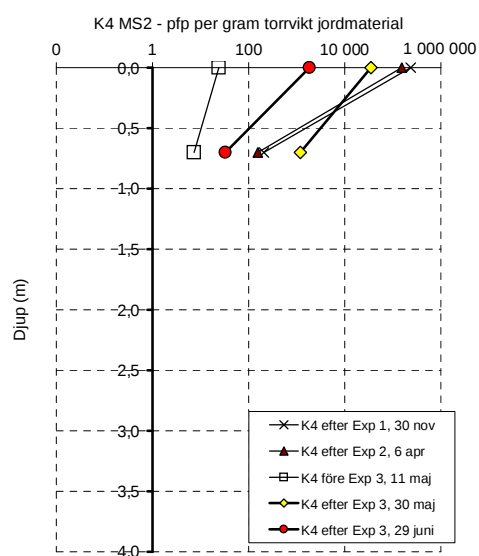
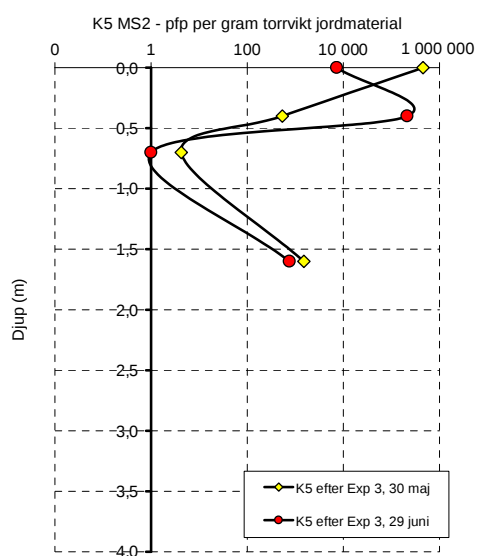
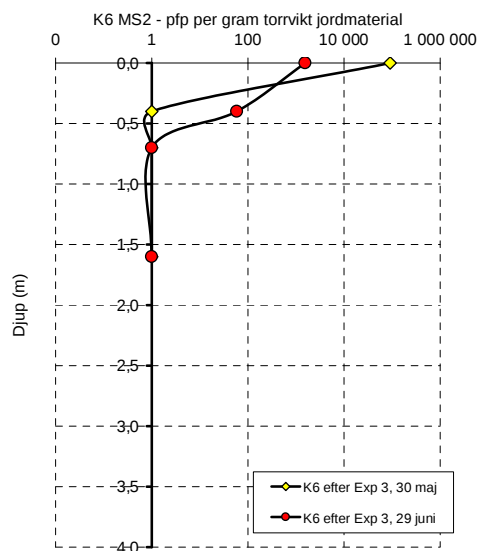
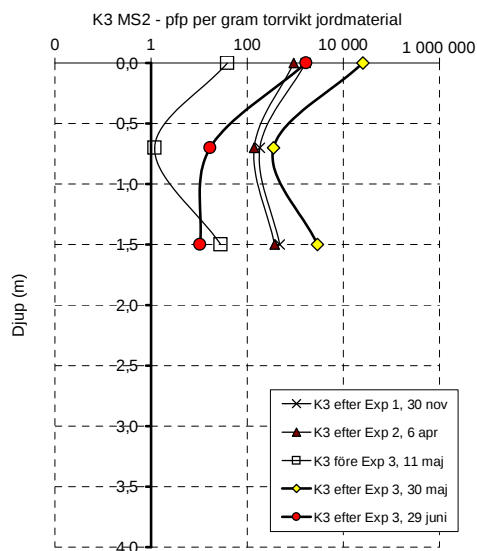
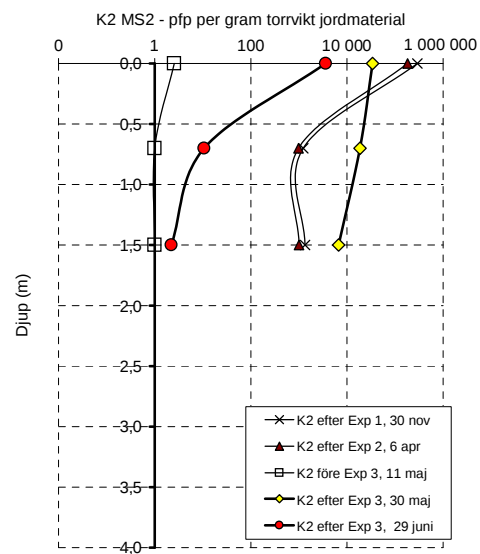
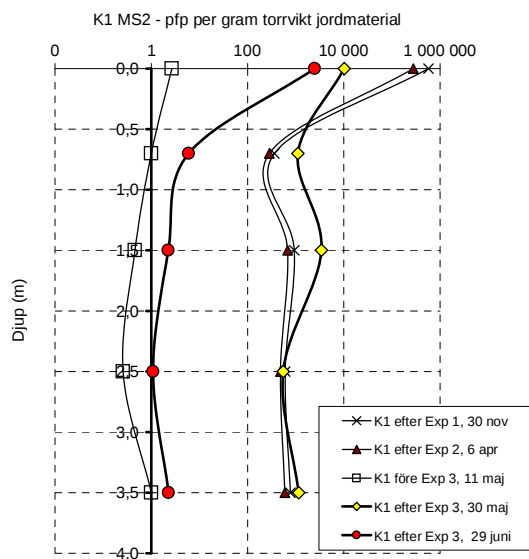
	Djup antal X174 antal MS-2			
	m	per g dw	per g ww	
K1 före Exp 3, 11 maj	0,0	6990,00	2,67	Tillsats 1: 1 nov 2004, Tillsats 2: 21 feb 2005, Tillsats 3: mix 1: 28 apr till 11 maj 2005, Tillsats 3: mix 2: 23 maj till 30 maj 2005.
	0,7	7739,56	<1	
	1,5	13800,00	0,46	
	2,5	11200,00	0,26	
	3,5	7010,00	<1	
K2 före Exp 3, 11 maj	0,0	6330,00	2,55	
	0,7	9490,00	<1	
	1,5	14100,00	<1	
K3 före Exp 3, 11 maj	0,0	9330,00	38,70	
	0,7	28700,00	1,19	
	1,5	9830,00	28,10	
K4 före Exp 3, 11 maj	0,0	506,39	24,10	
	0,7	4880,00	7,32	

Djup antal X174 antal MS-2				Djup antal X174 antal MS-2			
	m	per g dw	per g dw		m	per g dw	per g dw
K1 efter Exp 3, 30 maj	0,0	214000,00	10200,00	K1 efter Exp 3, 29 juni	0,0	41500,00	2490,00
	0,7	5260,00	1110,00		0,7	2040,00	6,01
	1,5	1430,00	3420,00		1,5	680,00	2,26
	2,5	1650,00	551,36		2,5	327,20	1,09
	3,5	3770,00	1160,00		3,5	803,12	2,29
K2 efter Exp 3, 30 maj	0,0	243000,00	34000,00	K2 efter Exp 3, 29 juni	0,0	21400,00	3630,00
	0,7	10500,00	18700,00		0,7	6760,00	10,70
	1,5	1120,00	6700,00		1,5	888,78	2,22
K3 efter Exp 3, 30 maj	0,0	447000,00	25400,00	K3 efter Exp 3, 29 juni	0,0	17200,00	1680,00
	0,7	39000,00	353,20		0,7	1690,00	16,90
	1,5	288,08	2880,00		1,5	635,98	10,40
K4 efter Exp 3, 30 maj	0,0	276000,00	35200,00	K4 efter Exp 3, 29 juni	0,0	8610,00	1850,00
	0,7	20080,00	1190,00		0,7	206,42	32,80
K5 efter Exp 3, 30 maj	0,0	234000,00	453000,00	K5 efter Exp 3, 29 juni	0,0	3650,00	7300,00
	0,4	607,38	540,00		0,4	107000,00	213000,00
	0,7	4,26	4,26		0,7	<0,03	<1
	1,6	21,50	1510,00		1,6	2,16	759,14
K6 efter Exp 3, 30 maj	0,0	419000,00	90800,00	K6 efter Exp 3, 29 juni	0,0	6010,00	1560,00
	0,4	12,10	<1		0,4	12,33	59,10
	0,7	<0,6	<1		0,7	<0,03	<1
	1,6	<0,5	<1		1,6	<0,03	<1

Bilaga F:2 Analysresultat för bakteriofager Φ X174 i kolonnsanden – Diagram



Bilaga F:3 Analysresultat för bakteriofager MS-2 i kolonnsanden – Diagram



Bilaga G:1 Geokemisk data av Gråbomaterial och Dösebacka material

Analyserad av KIWA Water Research 2004/2005 och beräknad av KIWA med Excelprogrammet GEO-CHEMCAL 5.1 (KIWA Water Research © 2000).

1	2	3	4	5	6	7	8	9
format	0,02	0,02		0	0,02	0,02	0,02	0,1
detection limit					0,01	0,01	0,01	0,01
INFO	Depth	Depth	TYPE	Mean	Clay	Grain	Grain	Gravel
Description	from	tot	Soil	Grain	Size	Size	Size	Size
			Type	Size	Fraction	<=16µm	<=210µm	Sieve
				(<2 mm)	laser<=8µm	laser<=22µm	laser<=250µm	>2000 µm
Unit	m-LS	m-LS		um	%	%	%	%
COLUMN CODE	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY
Dösebacka B1-8	8,00	8,00		824	3,34	4,92	9,79	68,7
Dösebacka B1-12	12,00	12,00		207	5,91	8,76	42,84	28,9
Dösebacka B2-8	8,00	8,00		697	1,70	3,71	18,76	86,3
Dösebacka B2-14	14,00	14,00		559	1,45	3,85	26,39	50,6
Dösebacka B3-17	17,00	17,00		382	1,66	3,06	30,63	4,7
Dösebacka B3-22	22,00	22,00		807	1,61	2,83	11,01	48,4
Grabo X				202	3,08	5,59	59,08	17,5
Grabo Y				299	2,27	4,04	43,96	19,0
Dösebacka Basin H surf	0,00	0,00		624	2,29	2,91	9,43	4,3
Dösebacka Basin H 0.0.1	0,00	0,10		688	1,32	1,64	6,56	5,0
Dösebacka Basin H 0.5	0,45	0,55		611	1,00	1,72	15,92	5,0
1	10	11	12	13	14	15	16	17
format	0,02	0	0,02	0,02	0	0,003	0	0,02
detection limit		1		0,01	100		50	
INFO	pHH2O	EC-H2O	BOM	PYR-C	PYR-N		Stot	CEC
Description	pH	EC	BEST	C-org	N-total	CaCO3	S-BEST	ACTUAL
	pH-H2O	H2O				BEST		BEST
Unit	-	20 oC	%	%	do: (%) * 10^4	%	mg / kg	meq / kg
COLUMN CODE	COPY	uS/cm	RES	COPY	mg / kg	CALC	RES	RES
0								
0								
Dösebacka B1-0	0,20	140	0,10	0,05	36	0,205	63	6,01
Dösebacka B1-12	8,46	158	0,05	0,03	20	0,488	136	21,84
Dösebacka B2-8	8,74	64	0,01	0,00	2	0,079	11	1,19
Dösebacka B2-14	7,76	19	0,04	0,00	0	0,279	31	3,59
Dösebacka B3-17	7,86	24	0,01	0,00	0	0,365	364	8,01
Dösebacka B3-22	8,43	20	0,005	0,00	1	0,285	33	4,20
Grabo X	6,80	46	0,03	0,00	15	0,229	61	12,81
Grabo Y	6,44	47	0,06	0,02	5	0,144	20	9,95
Dösebacka Basin H surf	6,87	373	0,62	0,31	429	0,141	66	20,50
Dösebacka Basin H 0.0.1	6,21	61	0,21	0,10	151	0,115	21	9,42
Dösebacka Basin H 0.5	6,78	22	0,07	0,04	57	0,105	16	5,89
1	18	19	20	21	22	23	24	25
format	0,02	0,02	0,10	0,02	0,003	0,02	0,02	0,02
detection limit								
INFO	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ca-	Na-	K-
Description	EXCH	EXCH	EXCH	EXCH	EXCH	SILICATE	SILICATE	SILICATE
	BEST	BEST	BEST	BEST	BEST	214,21	262,22	278,33
						ANORTITE	ALBITE	K-FELDSPAR
Unit	meq / kg	meq / kg	meq / kg	meq / kg	meq / kg	%	%	%
COLUMN CODE	CALC	CALC	CALC	CALC	CALC	CALC	CALC	11,26358049
0								
0								
Dösebacka B1-8	0,06	0,05	5,22	1,46	0,013	2,69	10,51	6,04
Dösebacka B1-12	0,20	0,15	16,74	4,69	0,042	6,26	21,51	12,39
Dösebacka B2-8	0,01	0,01	0,92	0,26	0,002	1,52	4,78	2,60
Dösebacka B2-14	0,03	0,02	2,75	0,77	0,007	5,96	16,36	9,36
Dösebacka B3-17	0,07	0,06	6,14	1,72	0,015	6,63	28,81	16,44
Dösebacka B3-22	0,04	0,03	3,22	0,90	0,008	4,74	17,58	9,29
Grabo X	0,12	0,09	9,81	2,75	0,024	5,66	27,08	16,35
Grabo Y	0,09	0,07	7,62	2,14	0,019	5,70	26,14	16,07
Dösebacka Basin H surf	0,19	0,14	15,71	4,41	0,039	4,24	30,13	19,10
Dösebacka Basin H 0.0.1	0,09	0,07	7,22	2,02	0,018	4,59	29,81	18,34
Dösebacka Basin H 0.5	0,05	0,04	4,52	1,27	0,011	6,77	29,19	16,44

1	26	27	28	29	30	31	32	33
format	0,02	0,01	0	0,1	0,02	0,02	0,02	0,02
detection limit								
INFO	Mg-	QUARTZ/OPAL	MAX	XRF-Si	XRF-Al	XRF-Na	XRF-K	XRF-Ca
Description	SILICATE	SiO2	FeS2	Si	Al	Na	K	Ca
	456,80	60,0848	119,975	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF
	BIOTITE	2,139						
Unit	%	%	mg / kg	%	%	%	%	%
COLUMN CODE	17,78096702	0,01	CALC	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY
0								
0								
Dosebacka B1-8	4,79	74,68	109	42,4	2,40	0,92	0,85	0,60
Dosebacka B1-12	9,57	47,19	251	37,4	5,06	1,89	1,75	1,40
Dosebacka B2-8	2,82	87,97	20	44,7	1,10	0,42	0,37	0,32
Dosebacka B2-14	10,81	58,55	55	39,3	3,95	1,44	1,32	1,23
Dosebacka B3-17	6,75	38,74	680	35,7	5,87	2,53	2,31	1,40
Dosebacka B3-22	6,59	61,20	60	39,9	3,76	1,54	1,31	1,01
Grabo X	9,03	40,14	112	36,2	5,70	2,38	2,30	1,17
Grabo Y	8,70	41,83	33	36,4	5,55	2,29	2,26	1,14
Dosebacka Basin H surf	6,54	33,03	75	33,7	6,16	2,64	2,69	0,88
Dosebacka Basin H 0-0.1	6,28	34,66	23	34,0	5,99	2,61	2,58	0,92
Dosebacka Basin H 0.5	7,44	33,58	24	33,4	6,16	2,56	2,31	1,32
1	34	35	36	37	38	39	40	41
format	0,02	0,02	0,003	0,003	0,02	0,1	0	0
detection limit						1	5	1
INFO	XRF-Mg	XRF-Fe	XRF-Mn	XRF-P	XRF-Ti	XRF-As	XRF-Ba	XRF-Cr
Description	Mg	Fe	Mn	P	Ti	As	Ba	Cr
	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF
Unit	%	%	%	%	%	mg / kg	mg / kg	mg / kg
COLUMN CODE	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY
0								
0								
Dosebacka B1-8	0,26	0,56	0,010	0,012	0,06	0,5	192	5
Dosebacka B1-12	0,53	1,23	0,025	0,025	0,14	0,3	412	15
Dosebacka B2-8	0,15	0,30	0,008	0,007	0,03	0,0	83	3
Dosebacka B2-14	0,58	1,19	0,025	0,026	0,13	0,3	317	10
Dosebacka B3-17	0,36	1,08	0,026	0,027	0,13	0,5	560	12
Dosebacka B3-22	0,35	0,85	0,017	0,019	0,10	0,1	295	11
Grabo X	0,49	1,21	0,030	0,038	0,15	0,0	563	18
Grabo Y	0,47	1,23	0,030	0,039	0,15	1,1	575	17
Dosebacka Basin H surf	0,36	1,12	0,024	0,028	0,14	0,6	638	20
Dosebacka Basin H 0-0.1	0,34	1,17	0,023	0,025	0,15	1,4	608	26
Dosebacka Basin H 0.5	0,40	1,19	0,025	0,026	0,15	0,4	575	17
1	42	43	44	45	46	47	48	49
format	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,1
detection limit	1	1	1	0,1	1	1	1	0,1
INFO	XRF-Cu	XRF-Ni	XRF-Pb	XRF-Sn	XRF-Sr	XRF-V	XRF-Zn	AR-As
Description	Cu	Ni	Pb	Sn	Sr	V	Zn	As
	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	HNO3
Unit	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg
COLUMN CODE	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY
0								
0								
Dosebacka B1-8	3,2	3,1	5,0	1,2	87	14,0	10,0	0,2
Dosebacka B1-12	8,9	8,3	15,0	1,2	199	30,2	20,4	0,5
Dosebacka B2-8	1,5	1,5	2,4	0,0	42	6,6	5,3	0,0
Dosebacka B2-14	8,0	6,4	8,6	1,9	158	27,0	20,6	0,2
Dosebacka B3-17	8,1	6,1	15,1	0,5	249	24,6	15,2	0,3
Dosebacka B3-22	4,0	5,1	8,7	1,0	150	20,0	12,7	0,1
Grabo X	9,0	7,1	16,2	0,0	242	26,7	21,7	0,3
Grabo Y	8,5	7,7	14,3	2,7	236	27,3	23,0	0,2
Dosebacka Basin H surf	13,0	8,8	16,6	2,2	220	27,5	43,0	0,3
Dosebacka Basin H 0-0.1	32,7	8,4	15,5	5,7	223	29,3	45,6	0,2
Dosebacka Basin H 0.5	14,6	8,8	15,8	1,9	252	33,8	28,5	0,3
1	50	51	52	53	54	55	56	57
format	0,1	0,02	0,1	0,1	0,02	0	0,003	0
detection limit	5	0,01	0,1	1	0,1	0,1	0,001	0,1
INFO	AR-Ba	AR-Cd	AR-Co	AR-Cr	AR-Cu	AR-Fe	AR-Hg	AR-Mn
Description	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn
	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3
Unit	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg
COLUMN CODE	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY
0								
0								
Dosebacka B1-8	9,2	0,01	1,1	1,8	2,73	2579	0,000	47
Dosebacka B1-12	23,7	0,03	3,1	6,0	7,88	6425	0,000	116
Dosebacka B2-8	6,0	0,00	0,5	0,7	1,45	1173	0,000	45
Dosebacka B2-14	20,8	0,01	2,1	2,9	6,22	4561	0,000	119
Dosebacka B3-17	13,9	0,01	1,9	3,0	6,16	4187	0,000	85
Dosebacka B3-22	10,8	0,00	1,2	2,6	3,47	3267	0,000	62
Grabo X	22,9	0,02	2,3	4,3	8,14	4921	0,000	142
Grabo Y	16,4	0,01	1,9	3,4	6,39	4052	0,000	113
Dosebacka Basin H surf	27,1	0,02	1,4	3,2	4,73	2555	0,000	83
Dosebacka Basin H 0-0.1	13,1	0,01	1,2	2,7	3,98	2154	0,000	59
Dosebacka Basin H 0.5	13,1	0,01	1,4	2,1	5,04	2254	0,000	55

1	58	59	60	61	62	63	64	65
format	0,1	0	0,1	0,02	0,02	0	0,1	0,1
detection limit	0,1		2	0,005	0,1		2	2
INFO	AR-Ni	AR-P	AR-Pb	AR-Se	AR-Sn	AR-Sr	AR-Ti	AR-V
Description	Ni	P	Pb	Se	Sn	Sr	Ti	V
	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3	HNO3
Unit	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg
COLUMN CODE	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY	COPY
0								
0								
Dösebacka B1-8	1,6	9	1,0	0,08	0,03	4	162,4	4,5
Dösebacka B1-12	5,4	16	4,7	0,12	0,09	11	463,5	11,2
Dösebacka B2-8	0,7	4	0,3	0,02	0,02	1	88,5	2,0
Dösebacka B2-14	2,8	17	1,6	0,10	0,07	5	321,6	8,3
Dösebacka B3-17	2,7	18	1,5	0,18	0,16	9	328,4	7,6
Dösebacka B3-22	2,4	12	0,9	0,08	0,11	6	243,5	5,6
Gräbo X	3,0	25	2,8	0,15	0,09	5	335,7	7,9
Gräbo Y	2,6	18	2,3	0,09	0,08	3	272,1	6,4
Dösebacka Basin H surf	2,1	15	1,6	0,08	0,29	5	148,9	5,6
Dösebacka Basin H 0.0.1	1,8	13	1,3	0,05	0,21	5	124,1	4,9
Dösebacka Basin H 0.5	1,8	14	1,4	0,08	0,23	4	132,1	5,0
1	66	67	68	69	70	71	72	73
format	0,1	0,1	0,1	0,1	0,02	0,02	0,003	0
detection limit	0,1							
INFO	AR-Zn	SUM	SUM	SUM	CLAYMIN			
Description	Zn	LANTHA-	CHALCO-	SIDERO-		N / C	P / C	Ca / Sr
	HNO3	NIDES	PHILE	PHILE		with	with	XRF
		TEs-AR	TEs-AR	TEs-AR		C-pyr	C-best	
Unit	mg / kg	mg / kg	mg / kg	mg / kg	%	mol/mol	mol/mol	mol/mol
COLUMN CODE	COPY	COPY	COPY	COPY	CALC	CALC	CALC	CALC
0								
0								
Dösebacka B1-8	7,0	25,6	11,1	2,8	3,33	0,06	0,096	150
Dösebacka B1-12	18,7	61,1	32,0	8,8	5,88	0,06	0,393	154
Dösebacka B2-8	3,1	7,9	5,0	1,3	1,70	0,16	0,514	164
Dösebacka B2-14	12,8	34,7	20,9	5,0	1,45	0,00	0,512	171
Dösebacka B3-17	10,5	57,9	18,7	4,8	1,65	0,00	2,127	123
Dösebacka B3-22	7,8	30,3	12,3	3,8	1,61	0,06	2,996	147
Gräbo X	14,4	82,3	25,9	5,5	3,07	0,37	0,984	105
Gräbo Y	11,5	71,8	20,6	4,7	2,27	0,02	0,506	106
Dösebacka Basin H surf	19,0	34,1	25,7	4,9	2,27	0,12	0,035	88
Dösebacka Basin H 0.0.1	22,1	33,8	27,6	4,0	1,32	0,13	0,094	90
Dösebacka Basin H 0.5	13,6	30,2	20,4	4,2	1,00	0,13	0,266	114
1								
format								
detection limit	2,5	0,5	50					
INFO	Ox-Fe	OX-Mn	OX-Al					
Description	Fe	Mn	Al					
	Oxalate	Oxalate	Oxalate					
Unit	mg / kg	mg / kg	mg / kg					
COLUMN CODE	LAB	LAB	LAB					
0								
0								
Dösebacka B1-8	4320	94	2587					
Dösebacka B1-12	4534	80	2391					
Dösebacka B2-8	2898	258	2126					
Dösebacka B2-14	4344	152	2370					
Dösebacka B3-17	2995	49	1108					
Dösebacka B3-22	3712	60	1393					
Gräbo X	3724	119	2023					
Gräbo Y	3497	127	2196					
Dösebacka Basin H surf	2540	83	446					
Dösebacka Basin H 0.0.1	1430	42	272					
Dösebacka Basin H 0.5	1230	25	312					
Resultatet i denna tabell utgörs av rapportdelen i GEO-CHEMCAL 5.1 (KIWA Water Research 2000) som visar värden baserad på labresultat, korrigeringar och modeller inom geokemi, vilka är resultatet från redovisning och beräkningar i excel. Resultat både från Gräbo och Dösebacka för jämförelse. COPY: the data in sheet has been copied from another excel folder in the CALC: The value is the result from calculations, based on model corrections and result. LAB: Result from analysis in the lab RES: Result from sample analysis								

Bilaga H:1 Analyismetoder med rapportgräns för analyser under studien

(Göteborgs va-verk/Lackarebäcks Laboratorium 2005).

Vissa analyser modifierades efter förutsättningarna. I de fallen anges detta i rapporten under aktuell studie.

Analyslista

- Icke ackrediterade analyser markerade med ""

- Analys utförd på Alelyckans driftlaboratorium markerad med "A/"

A	Analysnamn	Enhet	Rapportgräns	Osäkerhet	Analysinstruktion
*	Adenosintrifosfat	pg/0.1ml	0.3		
*	Adenosintrifosfat MF	RLU/20ml			
*	Aktinomycter MF	CFU/100ml	1		SS 028212-1
*	AlSO4-lösn densitet	kg/l			A/-
*	AlSO4-lösn densitet	kg/l			
*	Alkalinitet	mmol/l	0.01		A/-
*	Alkalinitet	mmol/l	0.01	10%	SS-EN ISO 9963-2 utgl
*	Aluminium ICP-MS	mg/l	0.001	18%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Aluminium ICP-MS filtr	mg/l	0.001		EPA 200.8 mod
*	Aluminium syralöst	mg/l	0.02		A/-
*	Aluminium syralöst	mg/l	0.02	21%	SS 028210-1
*	Aluminium syralöst filt	mg/l	0.02		A/-
*	Aluminium syralöst filt	mg/l	0.02	21%	SS 028210-1
*	Ammoniumkväve	µg/l	10	23%	SS-EN ISO 11732 utgl mod
*	Ammoniumkväve	µg/l	0.01	23%	SS-EN ISO 11732 utgl mod
*	Antimon ICP-MS	µg/l			EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Arsenik ICP-MS	µg/l	0.05	18%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Avsättbara ämnen	ml/l			
*	BOD7 spädning	mg/l	3	19%	SS-EN 1899-1 utgl
*	Barium ICP-MS	µg/l	0.5	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Beryllium ICP-MS	µg/l	0.01	20%	EPA 200.8 mod
*	Bly ICP-MS	µg/l	0.01	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Bly ICP-MS uppsl	µg/l	0.10	19%	EPA 3015&200.8 rev5.4 mod
*	Bor ICP-MS	µg/l	5	20%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Bromat IC	µg/l			SLV 1990-01-01
*	Bromid IC	mg/l	5		SS-EN ISO 10304-1
*	COD:Cr	mg/l	30	18%	SS-EN ISO 10304-1
*	COD:Mn	mg/l	1	17%	Dr Lang LCK 114
*	Cl. perfringens (pres) MF	CFU/100ml	1		fd SS 028118-1
*	E. coli 35°C MPN	ant/100ml	1		ISO/CD 6461-2 021220
*	Enterokocker 35°C MF	CFU/100ml	1		Colilert-18 ver1 040401
*	Extinktion 254 nm	ae/cm	0.015	20%	SS-EN ISO 7899-2 utgl
*	Fluorid IC	mg/l	0.1	21%	ver1 rev3 930617
*	Fosfatfosfor	µg/l	4	30%	SS-EN ISO 10304-1
*	Fosfatfosfor	mg/l			fd SS 028126-2
*	Fosfatfosfor	mg/l	0.004	30%	A/-
*	Fosfatfosfor	µg/l	4	23%	fd SS 028126-2
*	Fosfatfosfor	mg/l	0.004	23%	SS-EN 1189:1996 mod
*	Fosfatfosfor centr	mg/l	0.004	30%	SS-EN 1189:1996 mod
*	Fosfor totalt	µg/l	5	35%	fd SS 028126-2
*	Fosfor totalt	mg/l	0.005	35%	fd SS 028127-2
*	Fosfor totalt centr	mg/l	0.005	35%	fd SS 028127-2
*	Färgtal	mg/l Pt	5		fd SS 028127-2
*	Färgtal	mg/l Pt	5	5mg/l	A/-
*	Glödningsförlust	mg/l	20	18%	SS-EN ISO 7887 utgl del4
*	Glödningsrest	mg/l	20	18%	SS 028113-1
*	Heterotrofer 20°C 2d	CFU/ml	1		SS 028113-1
*	Heterotrofer 20°C 7d	CFU/ml	1		SS 028171-1
*	Heterotrofer 20°C 7d MF	CFU/100ml	1		SS 028171-1
*	Hydrogenkarbonat	mmol/l	0.01		SS 028171-1
*	Hydrogenkarbonat	mmol/l			A/-
*	Hårdhet total titr	mg/l	2	7%	SS 028121-2
*	Hårdhet total titr	mg/l	0.7		A/-
*	Jodid	µg/l			E/se separat rapport
*	Järn ICP-MS	mg/l	0.01	18%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Järn ICP-MS filtr	mg/l	0.01		EPA 200.8 mod
*	Järn ICP-MS uppsl	mg/l	0.20	19%	EPA 3015&200.8 rev5.4 mod
*	Järn f l e luftn o filt	mg/l	0.05		SS 028152-2
*	Jästsvamp MF	CFU/100ml	1		SS 028192-1
*	Kadmium ICP-MS	µg/l	0.01	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Kadmium ICP-MS uppsl	µg/l	0.10	19%	EPA 3015&200.8 rev5.4 mod
*	Kalcium ICP-MS	mg/l	0.01	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Kalcium ICP-MS filtr	mg/l	0.01		EPA 200.8 mod
*	Kalium ICP-MS	mg/l	0.05	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Kalium ICP-MS filtr	mg/l	0.05		EPA 200.8 mod
*	Kalk aktiv	%			A/-
*	Kalk totalt	g/l			A/-
*	Kalk totalt	g/l			
*	Kisel	mg/l	0.1	12%	Karlgrens kompendium
*	Klor frött	mg/l			A/-
*	Klor frött	mg/l			SS 028172-2 mod
*	Klor totalt	mg/l	0.03		A/-
*	Klor totalt	mg/l	0.03	12%	SS 028172-2 mod
*	Klorid IC	mg/l	1	17%	SS-EN ISO 10304-1
*	Klorid ICP-MS	mg/l	1	20%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Klorid ICP-MS filtr	mg/l	1		EPA 200.8 mod
*	Klorid titr	mg/l	5		A/-
*	Klorid titr	mg/l	5	20%	SIS 028120-1
*	Kobolt ICP-MS	µg/l	0.01	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Koliformer 35°C MF	CFU/100ml	1		SS 028167-2
*	Koliformer 35°C MPN	ant/100ml	1		Colilert-18 ver1 040401
*	Konduktivitet	mS/m	1		A/-
*	Konduktivitet	mS/m	1	5%	SS-EN 27 888-1
*	Koppar ICP-MS	µg/l	0.1	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Koppar ICP-MS uppsl	µg/l	0.5	19%	EPA 3015&200.8 rev5.4 mod
*	Krom ICP-MS	µg/l	0.2	20%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Krom ICP-MS uppsl	µg/l	1.0	24%	EPA 3015&200.8 rev5.4 mod
*	Kviksilver ICP-MS	µg/l	0.01	23%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Kviksilver ICP-MS uppsl	µg/l	0.10	24%	EPA 3015&200.8 rev5.4 mod
*	Kväve totalt	µg/l	80	27%	SS-EN ISO 11905-1:1997
*	Kväve totalt	mg/l	0.08	27%	SS-EN ISO 11905-1:1997
*	Litium ICP-MS	µg/l	0.5		EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Lukt 20°				SLV 1990-01-01
*	Lukt 50°				SLV 1990-01-01
*	Magnesium ICP-MS	mg/l	0.05	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Magnesium ICP-MS filtr	mg/l	0.05		EPA 200.8 mod

Bilaga H:2 Analyismetoder med rapportgräns för analyser under studien

(Göteborgs va-verk/Lackarebäcks Laboratorium 2005). Vissa analyser modifierades efter förutsättningarna. I de fallen anges detta i rapporten under aktuell studie.

A	Analysnamn	Enhet	Rapportgräns	Osäkerhet	Analysinstruktion
	Mangan ICP-MS	mg/l	0.001	18%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Mangan ICP-MS filtr	mg/l	0.001		EPA 200.8 mod
	Mangan ICP-MS uppsl	mg/l	0.010	19%	EPA 3015&200.8 rev5.4 mod
*	Metylenblätt	mg/g			A/-
	Mikroorganismer 22°C 3d	CFU/ml	1		SS-EN ISO 6222 utg1
*	Mikroorganismer 22°C 3d M	CFU/100ml	1		SS-EN ISO 6222 utg1
	Molybden ICP-MS	µg/l	0.05	18%	EPA 200.8 rev5.4 mod
	Mögelsvamp MF	CFU/100ml	1		SS 028192-1
*	NaClO2-lösn densitet	kg/l			
	Natrium ICP-MS	mg/l	0.05	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
*	Natrium ICP-MS filtr	mg/l	0.05		EPA 200.8 mod
	Nickel ICP-MS	µg/l	0.1	18%	EPA 200.8 rev5.4 mod
	Nickel ICP-MS uppsl	µg/l	0.5	23%	EPA 3015&200.8 rev5.4 mod
	Nitrat+nitritkväve	µg/l	30	20%	SS-EN ISO 13395 mod
	Nitrat+nitritkväve	mg/l	0.03	20%	SS-EN ISO 13395 mod
	Nitratkväve IC	mg/l	0.05	33%	SS-EN ISO 10304-1
	Nitritkväve	µg/l	1	23%	SS-EN 26777-1
	Oxygen elektr	mg/l	0.1	12%	SS-EN 25 814-1
	Oxygen titrering	mg/l	0.1	11%	SS-EN 25813-1
	Oxygenmättnad beräknad	%			
*	Partiklar FL	ant/ml	0.00E0		
	Selen ICP-MS	µg/l	0.1	20%	EPA 200.8 rev5.4 mod
	Siktdjup	m	0.1		SS-EN 27027: 1994 del 2.2
	Silver ICP-MS	µg/l	0.05	21%	EPA 200.8 rev5.4 mod
	Smak 20°				SLV 1990-01-01
*	Strontium ICP-MS	µg/l		20%	EPA 200.8 rev5.4 mod
	Sulfat IC	mg/l	1	15%	SS-EN ISO 10304-1
	Suspenderade ämnen	mg/l	5	25%	SS-EN 872-2
*	Tallium ICP-MS	µg/l	0.01	20%	EPA 200.8 mod
	Term kolif 44°C MF	CFU/100ml	1		SS 028167-2
*	Torkning				A/-
*	Torrsubstans	mg/l	20		A/-
	Torrsubstans	mg/l	20	18%	SS 028113-1
*	Turbiditet	FNU	0.05		A/-
	Turbiditet	FNU	0.05	17%	fd SS 028125-2
	Uran ICP-MS	µg/l	0.01	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
	Vanadin ICP-MS	µg/l	0.1	18%	EPA 200.8 rev5.4 mod
	Vismut ICP-MS	µg/l	0.01	17%	EPA 200.8 rev5.4 mod
	Zink ICP-MS	µg/l	1	18%	EPA 200.8 rev5.4 mod
	Zink ICP-MS uppsl	µg/l	5	23%	EPA 3015&200.8 rev5.4 mod
*	pH-värde		<3.0		A/-
	pH-värde		<3.0	0.2enh	SS 028122-2
*	pH-värde auto		<3.0		SS 028122-2 mod

Bilaga I Bakterier (och organiskt material) i Gråbosand efter experiment 4

Provdatum-	Kolonn	Djup (m)	Koliformer	E. Coli	Enterokocker	Cl. perfr	Beads	COD:Mn
			rmer	i 35°C	kocker			
			ant/100 ml	ant/100 ml	CFU/100 ml	CFU/100 ml	ant/ml	mg/mg grus
2005-09-13	Nr 01	0	610	<1	<1	44	4,44E+05	
2005-09-13	Nr 01	0,3	<1	<1	<1	7	5,73E+01	
2005-09-13	Nr 01	0,7	<1	<1	<1	1	4,24E+01	
2005-09-13	Nr 01	1	<1	<1	<1	<5	2,17E+01	
2005-09-13	Nr 01	1,5	<1	<1	<1	<5	1,10E+02	
2005-09-13	Nr 01	2	<1	<1	<1	<5	0,00E+00	
2005-09-13	Nr 01	2,5	<1	<1	<5	<5	5,17E+01	
2005-09-13	Nr 01	3	<1	<1	<5	<5	0,00E+00	
2005-09-13	Nr 01	3,5	<1	<1	<5	5	9,91E+01	
2005-09-13	Nr 06	0	86	<1	<5	5	1,01E+05	
2005-09-13	Nr 06	0,2	2	<1	<5	<5	1,21E+03	
2005-09-13	Nr 06	0,4	<1	<1	<5	<5	2,11E+01	
2005-09-13	Nr 06	0,7	<1	<1	<5	<5	4,09E+01	
2005-09-13	Nr 06	1,1	<1	<1	<5	<5	1,99E+02	
2005-09-13	Nr 06	1,6	<1	<1	<1	<5	1,31E+02	
2005-09-26	Nr 01	0	2000	300	85	15	7,51E+05	
2005-09-26	Nr 01	0,3	1	<1	<5	<5	1,49E+02	
2005-09-26	Nr 01	0,7	<1	<1	<0,5	<5	2,51E+02	
2005-09-26	Nr 01	1	<1	<1	<5	<5	2,49E+02	
2005-09-26	Nr 01	1,5	<1	<1	5	<1	9,98E+01	
2005-09-26	Nr 01	2	<1	<1	<5	<5	0,00E+00	
2005-09-26	Nr 01	2,5	<1	<1	<5	<5	4,99E+01	
2005-09-26	Nr 01	3	<1	<1	<5	5	7,94E+01	
2005-09-26	Nr 01	3,5	<1	<1	<5	<5	1,00E+02	
2005-09-26	Nr 06	0	>2400	1100	55	330	2,02E+06	
2005-09-26	Nr 06	0,2	180	21	5	<5	2,42E+04	
2005-09-26	Nr 06	0,4	4	1	<5	<5	0,00E+00	
2005-09-26	Nr 06	0,7	<1	<1	<5	<5	8,64E+04	
2005-09-26	Nr 06	1,1	<1	<1	<5	<5	3,01E+02	
2005-09-26	Nr 06	1,6	<1	<1	<5	<5	8,96E+01	
2005-09-30	Nr 00	0	214	6	1	52	1,42E+06	1,05
2005-09-30	Nr 00	0,5	<1	<1	<1	10	4,00E+01	0,99
2005-09-30	Nr 00	1	<1	<1	<5	<10	2,00E+02	1,1
2005-09-30	Nr 00	1,5	<1	<1	<1	10	1,33E+02	1,1
2005-09-30	Nr 01	0	1300	110	80	38	1,42E+06	1,46
2005-09-30	Nr 01	0,3						0,96
2005-09-30	Nr 01	0,7						1,04
2005-09-30	Nr 01	1						1,03
2005-09-30	Nr 01	1,5						0,96
2005-09-30	Nr 01	2						0,99
2005-09-30	Nr 01	2,5						0,96
2005-09-30	Nr 01	3						0,99
2005-09-30	Nr 01	3,5						0,4
2005-09-30	Nr 06	0	580		35	330	8,72E+05	0,97
2005-09-30	Nr 06	0,2						0,85
2005-09-30	Nr 06	0,4						0,87
2005-09-30	Nr 06	0,7						0,96
2005-09-30	Nr 06	1,1						0,85
2005-09-30	Nr 06	1,6						0,84

Bilaga J Grusundersökningar under försöken

När	Provtagningspunkter	Fager	Koliformer	E.coli	Fek. Stre.	Cl. perf.	3d	7d	Partiklar	Beads	ATP	COD
Efter avlopp (2003-12-16) <i>Förstudie; redovisas ej i denna rapport.</i>	Förstudiekolonn Yta + flera djup	–	Ja	Ja	–	–	Ja	Ja	–	Ja	Ja	–
Period 1 (2004-04-16). Redovisad i Bilaga E.	Gråbokolonner, Yta + 1,5 m djup, Oanvänt Gråbogrus	–	–	–	–	–	Ja	Ja	Ja	–	Ja	Ja
Efter tillsats 1 av fager (2004-11-30)	Gråbokolonner, Yta + flera djup	Ja	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Efter tillsats 2 av fager (2005-04-06)	Gråbokolonner, Yta + flera djup	Ja	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Tillsats 3, fager: efter mix 1 (utan fager) (ca 2005-05-11)	Gråbokolonner, Yta + flera djup	Ja	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Tillsats 3, fager: under mix 2 (med fager) (2005-05-30)	Gråbo och olivinkolonner Yta + flera djup	Ja	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Tillsats 3, fager: efter mix 2 (med fager) (2005-06-29)	Gråbo och olivinkolonner Yta + flera djup	Ja	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Före avlopp (2005-09-13)	4 meter mättad, 2 meter olivin (dp), yta + flera djup	–	Ja	Ja	Ja	Ja	–	–	–	Ja	–	–
Under avlopps (2005-09-26)	4 meter mättad, 2 meter olivin (dp), yta + flera djup	–	Ja	Ja	Ja	Ja	–	–	–	Ja	–	Ja ¹
Efter avlopps (2005-09-30)	Mättad kolonn, yta + flera djup	–	Ja	Ja	Ja	Ja	–	–	–	Ja	–	Ja

1) COD prov togs 2005-09-30



Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se