



Rapport

Diarienummer

NV Rapport 2026-05

Projektnummer

NFVP 4420

Patogenreduktion vid returströmsbehandling

Fördjupning till QMRA-modellen för nya Görvålverket

Johan Åström

Sweco i samarbete med Norrvatten

2026-08-25

Patogenreduktion vid returströmsbehandling

Fördjupning till QMRA-modellen för nya Görvålverket

Sweco Sverige AB	RegNo 556767-9849
Uppdrag	Norrvatten Görvålverket QMRA kompletteringar
Uppdragsnummer	30099581
Kund	Kommunalförbundet Norrvatten
Upprättad av	Johan Åström
Granskad av	Mikael Danielsson
Godkänd av	Johan Åström
Datum	2026-08-25
Ver	1
Dokumentreferens	Rapport Patogenreduktion vid returströmsbehandling, slutversion 260825

Innehållsförteckning

1	Bakgrund	3
1.1	Syfte	4
2	Returströmmar, logreduktion och hälsorisk.....	5
2.1	QMRA och Simulink	5
2.1.1	Kommentarer till frågeställningar	6
2.2	QMRA med returvattenflöden	8
2.3	Resultat från QMRA-modelleringar	9
2.3.1	Log-reduktion	9
2.3.2	Hälsorisk	10
3	Litteraturstudie	13
3.1	Projekten BarriNOR och SLAMiNOR	13
3.2	Frågeställningar lamellsedimentering	14
3.3	Lamellsedimentering och patogenreduktion	14
3.3.1	Driftförhållanden som påverkar	16
3.3.2	Andel patogener bundna till flockar/partiklar	17
3.4	Exempel på försök att göra	18
4	Bakterieavskiljning i liknande anläggning.....	19
4.1	Material och metod.....	19
4.2	Analyser med flödescytometri	19
4.3	Resultat	20

4.4	Tillämpning på GörvälInverket	20
5	Slutsatser och rekommendationer	22
6	Referenser	23
Bilaga 1:	Effekt av olika nivå av returflödesbehandling	25
A.	Ursprunglig konfiguration (5,45 log)	25
B.	Returflödet renas till samma halter som i råvattnet (0,915 log)	26
C.	Ingen behandling utöver avskiljning via slamfasen	27
D.	Ingen behandling eller avskiljning	28

1 Bakgrund

För att beräkna och säkerställa acceptabel hälsorisk i dricksvatten som kommer att produceras vid nya Görvälverket har tidigare en QMRA-modell (kvantitativ mikrobiologisk riskanalys) upprättats och använts (Tyréns 2024). Simuleringsresultaten visar att ett vattenverk med följande process med god marginal skulle tillförsäkra ett hälsosäkert dricksvatten: direktfällning på ultrafilter (UF) – kolfilter – UV-desinfektion – monokloramin. Att hälsosäkerheten är god baseras på jämförelsen med internationella riktvärden för daglig infektionsrisk, årlig infektionsrisk och funktionsjusterade levnadsår, DALY. Modell-simuleringar visar att denna beredningsprocess skulle öka den mikrobiologiska barriärverkan jämfört med det befintliga verket med minst 3,9 log för bakterier, 3,7 log för virus, 4,1 log för *Cryptosporidium* och 3,9 log för *Giardia*. Det innebär att de mikrobiologiska kvalitetskraven för det nya verket, uttryckt som 7b, 7v och 5,5p med stöd av Mikrobiologisk barriäranalys (MBA), klaras med god marginal. *Cryptosporidium* och *Giardia* är parasitära protozoer, förkortat p, och de behandlas samlat i en MBA.

För att nå ett bättre vattenutbyte och en mindre volym slam som måste behandlas föreslås att införa recirkulationsströmmar, där partikelanrikade flödesfraktioner återförs till tidigare steg i processen. Backspolvatten från ultrafiltersteget skulle då ledas tillbaka till inkommande flöde innan mikrosilen. Detta har identifierats som en potentiell mikrobiologisk risk eftersom partikelanrikade flödesfraktioner kan innehålla förhöjda halter patogener, även om slammet avlägsnas från processen. För att bättre förstå denna risk har patogenflöden modellerats med stöd av Simulink, ett grafiskt simuleringsverktyg integrerat med MATLAB (Lundwall m.fl. 2023; Fridén m.fl. 2025). Simuleringarna har visat att ultrafilter och mikrofilter för returströmsbehandling är tillräckligt effektiva för att inte returflödena ska öka patogenhalterna i dricksvatten. Genom dessa reningssteg skulle patogenerna ledas ut från processen mot förtjockning och slambehandling (Fridén m.fl. 2025).

Det står nu klart att ultrafilter såväl som mikrofilter som behandlingssteg för backspolvatten skulle vara kostsamma beredningsprocesser. Uppföljande simuleringar i Simulink visar att det vid ca 0,9 log reduktion av backspolvattnet inte sker någon haltökning när detta återförs till inkommande råvatten. Men är det nödvändigt att säkra upp 0,9 logs reduktion, eller kan det räcka med en enklare fällning och lamellsedimentering?

Utifrån hittills utförda utredningar är följande frågor angelägna att besvara:

- a) Hur förhåller sig de olika alternativen till returvattenbehandling till Norrvattens krav på barriärverkan avseende bakterier, virus och parasiter (7b, 7v och 5,5p) och till bedömningen om hur det nya vattenverket ökar den mikrobiologiska barriärverkan jämfört med det befintliga vattenverket?
- b) Vilken log-reduktion kan lamellsedimentering åstadkomma av bakterier, virus och parasiter, inklusive variation över tid, och vilken påverkan kan enskilda riskhändelser medföra?
- c) Hur stor andel patogener kan förväntas vara bundna till flockar och därmed möjliga att avskilja i lamellsedimentering, och skiljer det mellan bakterier, virus och parasiter?

1.1 Syfte

Syftet med denna rapport är att besvara ovannämnda tre frågor. Detta görs genom att returströmmar och log-reduktion kommenteras översiktligt med stöd av resultat från två norska projekt. Därefter beskrivs tidigare resultat från QMRA-modellen och Simulink-modellen. Detta följs av en uppdaterad QMRA-modellering för att visa hälsorisken med olika nivå av returströmsbehandling. Även resultatet av en litteraturstudie redovisas gällande vilken mikrobiologisk reduktion som lamellsedimentering kan åstadkomma och vilka driftförhållanden som påverkar, inklusive betydelsen av flockar. Rapporten avslutas med slutsatser och rekommendationer.

2 Returströmmar, logreduktion och hälsorisk

Syftet med recirkulering av vatten efter ultrafilter och andra membranfilter är dels att minska de förhållandevis stora vattenförluster som dessa beredningssteg ofta för med sig, dels att hantera restprodukter (slam) på ett effektivt sätt. Risken finns då att partikelanrikade flödesfraktioner återförs till tidigare steg i processen behöver bedömas och åtgärder övervägas. Särskilt den mikrobiologiska risken behöver bedömas och hanteras, eftersom patogener kan ge akuta hälsoeffekter och ett olämpligt förvarande i värsta fall leda till vattenburen smitta.

2.1 QMRA och Simulink

I QMRA-modellen för det nya Görvälverket, QMRA-modell 2024, beaktades inte effekten av returströmmar. Detta är nämligen inte en funktionalitet som finns i QMRA-verktyget i dess grundutförande (Chalmers 2026). QMRA-modellen visade att ett vattenverk med följande process med god marginal skulle tillförsäkra ett hälsosäkert dricksvatten: direktfällning på ultrafilter (UF) – kolfilter – UV-desinfektion – monokloramin (Tyréns 2024). Eftersom det i QMRA-verktyget inte är möjligt att studera effekten av returströmmar med olika nivåer av patogener, genomfördes separat modellering av detta i Simulink.

I Simulink kan olika processkonfigurationer sättas upp och studeras enligt massbalansens principer. Detta ger möjlighet till en djupare analys än vad QMRA-verktyget gör, där ingen hänsyn tas till flöden eller var patogenerna tar vägen efter att de avskiljs i ett beredningssteg. Simulink-modellen sattes upp av IVL och information om mikrobiologiska halter och dess log-reduktion i olika processteg hämtades från QMRA-modellen. Beräknade log-reduktionsvärden från QMRA-modellen användes som indata i Simulink-modellen för att beskriva avskiljningen eller inaktiveringen av ingående referenspatogener: *Giardia*, *Cryptosporidium*, *Campylobacter* och norovirus.

I Simulink-modellen (Fridén m.fl. 2025) analyserades följande två processförslag:

- **Originalförslaget.** Det grovsilade råvattnet tillsätts fällningskemikalie. Flockning sker i flockningskammare och flockarna avskiljs därefter i en lamellsedimentering, slammet tas ut i sedimentering och restflockarna filtreras bort i efterföljande snabbsandfilter. Detta följs av behandling i kolfilter och ultrafilter (UF1). Backspolvattnet från UF1 renas i ett ytterligare ultrafilter (UF2) och skickas tillbaka till UF1 igen. Detta så kallade originalförslag är inte längre aktuellt.
- **Förenklad process.** Konfigurationen innefattar direktfällning på ultrafilter (UF) – kolfilter (GAC) – UV-desinfektion. Jämfört med originalförslaget utgår alltså flockningskammare, lamellsedimentering och snabbsandfilter. Denna förenklade process har varit utgångspunkten i QMRA-modellen, där även monokloramin fanns med som ett avslutande beredningssteg (Tyréns 2024). Backspolvattnet från UF1 renas med antingen ultrafilter (UF2) eller mikrofilter (MF2).

I uppföljande simuleringar (Fridén 2025) testades fyra olika nivåer av returvattenbehandling:

- A. Ursprunglig konfiguration (5,45 log) med ultrafiltrering (UF2)
- B. Returflödet renas till samma halter som i råvattnet (0,915 log)
- C. Ingen behandling utöver avskiljning via slamfasen
- D. Ingen behandling eller avskiljning

Resultatet av simuleringarna visas som diagram i Bilaga 1, dels som total log-reduktion över vattenverket (med tillhörande tabell), dels som halt strax efter UV-steget.

Det är alternativ C som nu är mest angeläget att studera vidare, eftersom det inte fordrar en omfattande beredning. Det innebär samtidigt ett returvatten som kan vara av sämre kvalitet än inkommande råvatten, och konsekvensen behöver då analyseras med en uppdaterad QMRA-modell (se vidare nedan).

2.1.1 Kommentarer till frågeställningar

Resultat från Simulink-modellen av Fridén m.fl. (2025) samt de resultat som visas i Bilaga 1 (Fridén 2025) kommenteras nedan utifrån tre frågeställningar, formulerade av Norrvatten inför detta uppdrag:

(i) Hur påverkas den totala log-reduktionen över vattenverket av patogenreduktion vid olika nivåer av returströmsbehandling?

Fridén m.fl. (2025) visade alltså med simuleringar hur olika nivåer av returströmsbehandling påverkar den totala log-reduktionen över vattenverket. Genom att inte returvattnet innehåller högre halter än inkommande råvatten säkerställs att råvattnet inte försämrats. Att returvattnet ska hålla samma beskaffenhet som råvattnet har föreslagits som ett krav internationellt, bland annat i studier från Norge och i riktlinjer från Australien (se nedan). För att testa denna behandlingsåtgärd i Simulink-modellen sänktes log-reduktionen (i UF2/MF2-filtren) stegvis för alla patogener tills halterna i returströmmen hade samma koncentration (100 patogener/kg) som råvattnet. Detta inträffade när patogennivåerna i returströmmen sänkts med 0,915 log. Totala logreduktionen över vattenverket sjönk då bara en aning i sista siffran (andra decimalen).

Resultatet av returströmsbehandling som ger 0,915 log visas i Bilaga 1, avsnitt B. Detta kan jämföras med den omfattande returströmsbehandling med ultrafilter som kan ge 5,45 log, avsnitt A. Den lägre returströmsbehandlingen innebär att den totala log-reduktionen över vattenverket enbart minskar i första eller andra decimalen (jämförelse mellan tabellerna i Bilaga 1). Returströmsbehandlingen kan göras ännu enklare: antingen genom att enbart avskilja slam eller genom ingen behandling alls. Båda dessa alternativ minskar den totala log-reduktionen över vattenverket, vilket visas i Bilaga 1 (se vidare avsnitt 2.3.1).

(ii) Hur ska variation/osäkerhet i resultat förstås i relation till antagen log-reduktion i respektive beredningssteg, såsom värden som ligger utanför 1-percentilsvärdet?

Begreppet variation syftar vanligen på den naturliga variabiliteten, i detta fall att log-reduktionen av patogener över ett beredningssteg inte är exakt densamma hela tiden utan förknippad med en variation. Begreppet osäkerhet syftar på brist på kunskap, och skulle kunna minskas genom ytterligare mätningar. Antagen log-reduktion i respektive beredningssteg är hämtad från QMRA-modellens simuleringresultat och beskriver det förstnämnda: den troliga variationen i vardera steg. I QMRA-modellen tas hänsyn till att genombrott inträffar nu och då, vilket visas som "spikar" i diagrammen i Bilaga 1.

För att beskriva variation används vanligen diagram som endera visar en täthetsfunktion (PDF; probability density function), eller en kumulativ täthetsfunktion (CDF; cumulative density function) vilket gjorts i rapporterna från Simulink-modelleringarna (Fridén m.fl. 2025; Lundwall m.fl. 2023). Det går även att beskriva denna variation genom enskilda värden. Med ett 1-percentilsvärde exempelvis anges att endast 1 % av slumpade värden från nämnda täthetsfunktion understiger angivet värde. Med 50-percentilsvärdet anges att av slumpade värden är det lika många som understiger respektive som överstiger angivet värde. Med 99-percentil anges att 99 % av slumpade värden understiger angivet värde, dvs. enbart 1 % av värdena ligger högre.

Resultaten från Simulink-modelleringarna presenterades som 1-, 50- respektive 99-percentilsvärden. För exempelvis Norovirus anges att den totala log-reduktionen blir 9,5 sett till 1-percentil, 10,6 sett till 50-percentil samt 11,9 sett till 99-percentil. Detta kan jämföras

med kravet 7 logs reduktion för norovirus; se Tabell 2 i Fridén m.fl. (2025). Det finns således en risk att log-reduktionen 1 % av tiden ligger lägre än 9,5. Orsaken till detta är att råvattenhalterna beskrivits med gamma-fördelningar, vilket är en kontinuerlig fördelning som går från noll (0) och uppåt. Effekten av gamma-fördelningarna ska därför här förklaras kortfattat.

Att gamma-fördelningen är kontinuerlig innebär att den kan anta vilka positiva värden som helst, inte bara heltal utan decimaltal och i teorin även hur höga värden som helst. Även om gamma-fördelningen troligen är det bästa sättet att beskriva råvattenhalten utifrån givna patogendata (Åström 2018), så får denna egenskap hos gamma-fördelningen effekten att log-reduktionen på vattenverket i teorin kan gå mot hur låga värden som helst. De övriga beredningsstegen på det framtida vattenverket har en log-reduktion som inte tillåts gå mot oändlighet, utan har ett minsta och ett högsta värde, men så är det inte med råvattenhalten när den definieras med en gamma-fördelning.

Det är beskrivningen av patogenhalter i råvattnet, sådana dessa är definierade i gamma-fördelningar, som orsakar det som syns som "spikar" i simuleringarna i Simulink (se diagrammen i Bilaga 1). I diagrammen över total log-reduktion över vattenverket syns detta som spikar i nedåtgående riktning. I diagrammen som avser halter efter UV-steget går i stället spikarna uppåt. I praktiken kan dock inte råvattenhalterna varken bli hur höga eller hur låga som helst. När råvattenhalten går mot noll sjunker logreduktionen men det påverkar inte infektionsrisken. För att ta hänsyn till detta skulle Gamma-fördelningen behöva trunkeras¹ och spikarna skulle då minska i magnitud. Vad som är lämpligt värde för trunkering skulle vara mycket svårt att avgöra och det skulle bli en gissning. Det kan dock allmänt sägas vara en överdrift att påstå att en log-reduktion under i detta fall 1-percentilsvärdet (Cilow i Bilaga 1) förekommer så pass ofta som 1 % av tiden.

(iii) **Vad blir effekten av eventuella genombrottshändelser?**

De slumpvisa genombrottshändelser som kan förväntas inträffa i respektive beredningssteg är inberäknade i den log-reduktion som beskrivs i QMRA-modellen för respektive beredningssteg. Sannolikheten för dessa genombrottshändelser anges i Tabell 1 i Fridén m.fl. (2025). För exempelvis UF-steget är denna statistik hämtat från en befintlig UF-anläggning i en annan del av landet (Tyréns 2024). Här är dessutom konservativt antaget att genombrottet drabbar en hel modul. Totalt 2805 moduler antas finnas, och med angiven sannolikhet bedöms fullständigt genombrott inträffa mellan 0,02 och 0,9 minuter per år i vardera modulen.

Även om antagandena kan förfinas och förbättras, genom att ta hänsyn till att vattnet hellre tar vägen genom en trasig modul än genom hela moduler, så tar alltså resultaten från Simulink-modelleringen hänsyn till genombrottshändelser. För att se och förstå dessa, är 1- och 99-percentilvärdena användbara, även om värdena i Bilaga 1 hade blivit mer gynnsamma om gamma-fördelningarna hade trunkerats (se ovanstående svar på frågeställning ii). Även diagram som visar log-reduktion över en lägre simulering visar på effekten av sådana typer av händelser, se diagrammen i Lundwall m.fl. (2023).

Genombrottshändelser väntas inträffa även på det nya vattenverket vilket avspeglas både i tidigare QMRA- modellering och i Simulink-modellering. Extremvärden utanför 1- och 99-percentilsvärdet i dessa modelleringar bör dock tolkas med försiktighet. Den tidigare upprättade QMRA-modell har tydligt visat att log-reduktionen i det nya vattenverket är mycket stabil och med god marginal till hälsobaserade riktvärden (Tyréns 2024).

¹ Trunkering av en sannolikhetsfördelning innebär att man begränsar fördelningen till ett visst intervall och utesluter värden utanför detta intervall helt. Därefter normaliseras fördelningen om, så att den totala sannolikheten inom intervallet blir 1.

För att förstå hälsoeffekten av genombrottshändelser vid returvattenflöden behöver ytterligare modelleringar göras i QMRA-modellen, med stöd av resultaten från Simulink-modellering. Av denna anledning har QMRA-modellen uppdaterats.

2.2 QMRA med returvattenflöden

QMRA-modellen från 2024 uppdaterades för att kunna simulera de ovannämnda fyra olika nivåerna av returvattenbehandling. Definierad total log-reduktion över nya Görvälnverket vattenverket som helhet, från råvattenintag till efter UV, vid olika alternativ till returströmsbehandling visas i Tabell 1. Triangelfördelningar definierades utifrån resultat från Simulink-modelleringarna (Bilaga 1). 1-percentilsvärdet (Cilow) användes för att definiera min-värdet, 50-pecentilen (median) definierade troligaste värde och 99-percentilsvärdet (Cihigh) definierade max-värdet.

I QMRA-modellen, som utgör en modifiering av QMRA-verktyget, definierades en ny modul "Hela beredningsprocessen med returflöden" där log-reduktionen angiven i Tabell 1 definierades. Varje returströmsbehandlingsalternativ definierades i en separat beräkningsnod. Resultatet används för att beräkna patogenhalten i en nod benämnd "Efter UV med retur" som sedan användes för att beräkna dosen i utgående dricksvatten. I fallen med returströmsbehandling bortses från monokloramin, som nu inte planeras ingå i den nya beredningsprocessen.

Tabell 1. Definierad total log-reduktion över nya Görvälnverket vattenverket som helhet, från råvattenintag till efter UV, vid olika alternativ till returströmsbehandling. Värden hämtade från Bilaga 1, medianvärdet används för att ange troligaste värde.

Behandlingsalternativ	Referenspatogen	Parametrar i Triangelfördelning		
		Min	Troligast	Max
A. Ursprunglig konfiguration	Campylobacter	11,19	12,81	14,58
	Norovirus	9,53	10,62	11,87
	Cryptosporidium	8,64	9,73	10,92
	Giardia	7,96	9,16	10,46
B. Renat till råvattenhalter	Campylobacter	11,09	12,74	14,54
	Norovirus	9,40	10,59	11,81
	Cryptosporidium	8,60	9,68	10,87
	Giardia	7,92	9,11	10,43
C. Enbart slamavskiljning	Campylobacter	10,38	12,02	13,80
	Norovirus	8,77	9,86	11,12
	Cryptosporidium	7,89	8,95	10,18
	Giardia	7,19	8,39	9,69
D. Ingen behandling alls	Campylobacter	9,54	11,16	12,93
	Norovirus	7,93	9,03	10,25
	Cryptosporidium	7,04	8,13	9,32
	Giardia	6,36	7,56	8,86

2.3 Resultat från QMRA-modelleringar

2.3.1 Log-reduktion

Log-reduktion för ingående beredningssteg och totalt vid det nya verket visas som 50-percentil (P50) och 1-percentil (P01) i Tabell 2. I den övre delen av tabellen visas resultat enligt QMRA-modellen från 2024, dels separat för ingående beredningssteg och dels totalt (Tyréns 2024). I den undre delen av tabellen visas resultat baserade på den log-reduktion som beräknats med Simulink-modellen från 2025 (Fridén 2025). Till skillnad från QMRA-modellen från 2024 ingick i Simulink-modellen inte monokloramin, då detta nu inte planeras ingå som beredningssteg i det nya vattenverket.

Resultaten visar att med returströmsbehandlingsalternativ A och B (Ursprunglig konfiguration samt Renat till råvattenkvalitet) uppnås samma totala log-reduktion som om inga returflöden alls skulle återföras in i processen. Att returströmsförfarandet förefaller ge en något högre total log-reduktion än QMRA 2024 beror på att 1-percentilsvärdet betraktats som ett minsta värde. Returströmsbehandling med enbart slamavskiljning (C) eller ingen behandling alls (D) minskar den totala log-reduktionen med i medeltal 0,8 respektive 1,6 jämfört med alternativen A och B. Vilken effekt detta får på hälsorisker beskrivs vidare nedan.

Tabell 2. Log-reduktion för ingående beredningssteg och totalt vid det nya verket, enligt modellerna QMRA 2024 och Simulink 2025 för olika grad av returflödesbehandling.

Modell	Returströmmar	Percentil	Referenspatogen	Beredningssteg och totalt:				Monoklor-amin	Totalt
				Ultrafilter 20 nm	Kolfilter	UV-ljus			
QMRA 2024	Inga	P50	Campylobacter	5,9	1,5	5,3	0,2	13,0	
			Norovirus	5,9	0,5	4,2	0,0	11,0	
			Cryptosporidium	5,9	0,8	3,0	0,0	9,7	
			Giardia	5,9	0,8	2,4	0,0	9,2	
		P01	Campylobacter	4,8	0,5	5,3	0,1	11,0	
			Norovirus	4,8	0,2	4,2	0,0	9,3	
			Cryptosporidium	4,7	0,7	3,0	0,0	8,4	
			Giardia	4,8	0,5	2,4	0,008	7,7	
				Totalt för olika grad av returströmsbehandling:					
Simulink 2025	Ja	P50	Campylobacter	A	B	C	D		
			Norovirus	12,8	12,8	12,1	11,2		
			Cryptosporidium	10,7	10,6	9,9	9,0		
			Giardia	9,8	9,7	9,0	8,1		
		P01	Campylobacter	9,2	9,1	8,4	7,6		
			Norovirus	11,5	11,4	10,6	9,8		
			Cryptosporidium	9,7	9,6	8,9	8,1		
			Giardia	8,8	8,8	8,1	7,2		
				8,2	8,1	7,4	6,5		

Det befintliga Görvälverket har en log-reduktion som är lägre än vid alla alternativ till returströmsbehandling på det framtida vattenverket. Log-reduktionen på det befintliga verket är för motsvarande referenspatogener, här angivet som medelvärde med 1-percentilsvärde (P01) inom parentes: *Campylobacter* 7,2 (6,9), Norovirus 6,0 (5,6), *Cryptosporidium* 4,7 (4,4) och *Giardia* 4,1 (3,8) (Tyréns 2020; Tyréns 2024). Detta är minst ett par log-enheter lägre än vid helt utebliven returströmsbehandling (alternativ D, Tabell 2).

2.3.2 Hälsorisk

Hälsorisk uttryckt som daglig infektionsrisk och årlig infektionsrisk beskrivs i Tabell 3 respektive i Tabell 4. Här används en färgskala som går från lägsta (grönt) till högsta (rött) värde i tabellen. När det gäller daglig infektionsrisk används här riktvärdet 1×10^{-6} (1E-6) vilket föreslagits av Signor och Ashbolt (2009). Resultat visas dels för olika nivåer av returströmsbehandling, dels för olika råvattenhalter. Varierande halt utgår från tidigare patogenmätningar i dess helhet, momentan värsta fall-halt från ett högsta rimliga värde utifrån den fördelningsfunktion som beskriver halten av respektive referenspatogen (Tyréns 2020; Tyréns 2024).

Sammanställningen avspeglar det som redan visats ovan gällande total log-reduktion, nämligen att returflödesbehandling med ursprunglig konfiguration (A) och rening till råvattenhalter (B) ger samma nivå av infektionsrisk som om inga flöden förts i retur. Enbart slamavskiljning (C) höjer den dagliga infektionsrisken, dock till nivåer som är minst 3 log-enheter lägre än riktvärdet. En ytterligare höjning skulle ske vid ingen behandling alls (D), vilket visas nederst i tabellen. Infektionsrisken är naturligt nog högre vid en momentan värsta fall-halt jämfört med vid varierande råvattenhalter, men med ovannämnda marginal till riktvärdet.

Tabell 3. Daglig infektionsrisk i utgående dricksvatten för det nya verket, vid olika nivåer av patogenhalt i råvattnet. Färgskalan går från lägsta värde (grönt) till högsta värde (rött).

Returflödesbehandling	Råvatten	Percentil	Campylo-bacter	Norovirus	Crypto-sporidium	Giardia
Inget returflöde (QMRA 2024)	Varierande halt	P50	3,3E-14	6,9E-14	1,2E-15	1,7E-22
		P95	2,5E-12	3,1E-11	9,6E-12	6,0E-14
		P99	1,4E-11	1,4E-10	3,9E-11	7,7E-13
	Momentan värsta fall	P50	1,4E-12	7,9E-11	2,1E-12	2,0E-13
		P95	5,6E-11	1,2E-09	1,1E-10	2,2E-12
		P99	2,1E-10	2,9E-09	2,0E-10	4,9E-12
A. Ursprunglig konfiguration	Varierande halt	P50	4,5E-14	1,0E-13	8,4E-16	1,0E-22
		P95	3,2E-12	2,9E-11	6,0E-12	6,5E-14
		P99	7,9E-12	1,0E-10	5,1E-11	6,2E-13
	Momentan värsta fall	P50	2,1E-12	7,6E-11	1,5E-12	1,8E-13
		P95	6,9E-11	9,1E-10	5,7E-11	1,5E-12
		P99	1,6E-10	1,7E-09	1,4E-10	2,9E-12
B. Renat till råvattenhalter	Varierande halt	P50	6,2E-14	1,1E-13	9,2E-16	1,5E-22
		P95	2,8E-12	3,0E-11	7,2E-12	1,2E-13
		P99	7,9E-12	1,3E-10	3,8E-11	5,8E-13
	Momentan värsta fall	P50	2,4E-12	8,3E-11	1,9E-12	2,2E-13
		P95	7,6E-11	1,1E-09	7,1E-11	2,0E-12
		P99	1,8E-10	2,1E-09	1,4E-10	3,3E-12
C. Enbart slamavskiljning	Varierande halt	P50	2,8E-13	4,5E-13	4,1E-15	5,4E-22

Returflödesbehandling	Råvatten	Percentil	Campylo- bacter	Norovirus	Crypto- sporidium	Giardia
D. Ingen behandling alls	Momentan värsta fall	P95	1,6E-11	2,0E-10	4,4E-11	3,6E-13
		P99	5,1E-11	5,7E-10	2,5E-10	3,9E-12
		P50	1,1E-11	5,1E-10	8,9E-12	1,0E-12
		P95	3,3E-10	4,7E-09	3,6E-10	9,3E-12
		P99	1,1E-09	9,9E-09	8,3E-10	1,8E-11
		P50	2,4E-12	4,6E-12	2,7E-14	5,9E-21
	Varierande halt	P95	1,2E-10	9,1E-10	2,2E-10	2,9E-12
		P99	3,9E-10	3,1E-09	1,9E-09	3,7E-11
		P50	8,8E-11	3,1E-09	4,9E-11	7,2E-12
		P95	2,6E-09	3,8E-08	2,5E-09	5,8E-11
		P99	6,6E-09	6,5E-08	6,0E-09	1,0E-10
Riktvärde	Signor et al. 2009		1,0E-06	1,0E-06	1,0E-06	1,0E-06

Hälsorisk i utgående dricksvatten för nya Görvälverket, med olika returflödesalternativ, redovisas som årlig infektionsrisk i Tabell 4 och som DALY i Tabell 5. I alla alternativen till returflödesbehandling ligger den årliga infektionsrisken ca 3 log-enheter lägre än USEPA:s riktvärde 1×10^{-4} (1E-4). Färgskalan visar att infektionsrisken är ungefär 10 gånger högre i alternativet med enbart slamavskiljning (C) jämfört med vid rening till råvattenhalter (B). Risken är dock i alternativ C, enbart slamavskiljning, betryggande låg jämfört med nämnda riktvärde, minst 4 log-enheter (10 000 gånger lägre).

Tabell 4. Årlig infektionsrisk i utgående dricksvatten för nya Görvälverket, med olika returflödesalternativ. Färgskalan går från lägsta värde (grönt) till högsta värde (rött).

Returflödesbehandling	Percentil	Campylobacter	Norovirus	Cryptosporidium	Giardia
Inget returflöde (QMRA 2024)	P50	2,5E-10	2,6E-09	5,7E-10	1,2E-11
	P95	4,0E-10	4,0E-09	9,2E-10	1,9E-10
	P99	4,7E-10	4,6E-09	1,1E-09	2,0E-10
A. Ursprunglig konfiguration	P50	2,3E-10	2,0E-09	5,8E-10	8,3E-12
	P95	3,1E-10	2,7E-09	8,8E-10	1,3E-11
	P99	3,8E-10	3,1E-09	1,0E-09	1,6E-11
B. Renat till råvattenhalter	P50	2,3E-10	2,6E-09	4,9E-10	1,2E-11
	P95	2,9E-10	3,6E-09	7,8E-10	2,1E-11
	P99	3,1E-10	4,2E-09	9,0E-10	2,6E-11
C. Enbart slamavskiljning	P50	1,3E-09	1,2E-08	2,8E-09	7,8E-11
	P95	1,6E-09	1,7E-08	4,2E-09	1,5E-10
	P99	1,8E-09	2,0E-08	4,8E-09	1,9E-10
D. Ingen behandling alls	P50	1,0E-08	7,7E-08	1,9E-08	4,7E-10
	P95	1,3E-08	1,1E-07	2,8E-08	8,0E-10
	P99	1,4E-08	1,2E-07	3,3E-08	9,7E-10
Riktvärde USEPA		1,0E-04	1,0E-04	1,0E-04	1,0E-04

Funktionsjusterade levnadsår (DALY; Disability Adjusted Life Years) är ett mått på hälsopåverkan där WHO angett som riktvärde 1 DALY per 1 000 000 personer och år. Detta motsvarar 1×10^{-6} (1E-6), även betecknat 1 µDALY/person och år. Med stöd av QMRA-modell 2024 har konstaterats att det nya vattenverket, med beredningskedjan fällning på ultrafilter, kolfilter (GAC), UV-ljus (400 J/m²) och monokloramin, ger ett dricksvatten som ligger långt under detta gränsvärde (Tyréns 2024). Resultat från QMRA-modellen som anger DALY i utgående dricksvatten visas överst i Tabell 5 för nya Görvälverket, med resultat för olika returflödesalternativ därunder.

Så liknande sätt som med daglig och årlig infektionsrisk, så ökar hälsopåverkan (DALY) med minskad returflödesbehandling. Även här ger alternativ A (ursprunglig konfiguration) och B (renat till råvattenkvalitet) likvärdig risk. För såväl daglig infektionsrisk, årlig infektionsrisk och DALY ökar alternativ C (enbart slamavskiljning) risken 5-7 gånger jämfört med B. Alternativ D (ingen behandling alls) ökar risken 30-46 gånger jämfört med B.

Tabell 5. DALY i utgående dricksvatten för nya Görvälverket, med olika returflödesalternativ. Färgskalan går från lägsta värde (grönt) till högsta värde (rött).

Returflödesbehandling	Percentil	Campylobacter	Norovirus	Cryptosporidium	Giardia
Inget returflöde (QMRA 2024)	P50	2,5E-10	2,6E-09	5,7E-10	1,3E-11
	P95	4,0E-10	3,9E-09	9,3E-10	1,2E-10
	P99	5,1E-10	4,6E-09	1,1E-09	2,1E-10
A. Ursprunglig konfiguration	P50	2,3E-10	2,0E-09	5,8E-10	8,3E-12
	P95	3,1E-10	2,7E-09	8,8E-10	1,3E-11
	P99	3,8E-10	3,1E-09	1,0E-09	1,6E-11
B. Renat till råvattenhalter	P50	2,3E-10	2,6E-09	4,9E-10	1,2E-11
	P95	2,9E-10	3,6E-09	7,8E-10	2,1E-11
	P99	3,1E-10	4,2E-09	9,0E-10	2,6E-11
C. Enbart slamavskiljning	P50	1,3E-09	1,2E-08	2,8E-09	7,8E-11
	P95	1,6E-09	1,7E-08	4,2E-09	1,5E-10
	P99	1,8E-09	2,0E-08	4,8E-09	1,9E-10
D. Ingen behandling alls	P50	1,0E-08	7,7E-08	1,9E-08	4,7E-10
	P95	1,3E-08	1,1E-07	2,8E-08	8,0E-10
	P99	1,4E-08	1,2E-07	3,3E-08	9,7E-10
Riktvärde WHO		1,0E-06	1,0E-06	1,0E-06	1,0E-06

3 Litteraturstudie

3.1 Projekten BarriNOR och SLAMiNOR

I de norska projekten BarriNOR och SLAMiNOR var den mikrobiologiska risken med returströmmar en av de frågeställningar som belystes genom olika fallstudier (Eikebrokk m.fl. 2024). Rapporten från projektet beskriver både den kvantitativa och den kvalitativa sammansättningen av returströmmar från olika vattenberedningsprocesser. Fokus låg på klarfasen från lamellförtjockare och backspolvatten från slamcentrifugering vid koaguleringsanläggningar (kemisk fällning, sedimentering, filtrering).

Några konstateranden om returströmmar från rapporten är:

- Klarfasen från lamellförtjockare och första filtratet skickas ofta i retur till något av de första stegen i beredningskedjan för att behandlas tillsammans med råvattnet.
- Backspolvattnet från slamavvattningen har betydligt sämre kvalitet och rekommenderas att inte skickas tillbaka för beredning under några omständigheter.
- Returströmmar med sämre hygienisk kvalitet än inkommande råvatten kan med tiden medföra risk för ackumulering av mikroorganismer i beredningsprocessen. Försök vid en pilot-anläggning i Kattås (i Norge, koagulering och snabbfiltrering), där returflödet utgjorde 5 % av råvattenströmmen, visade dock inga betydande effekter av returströmmen.
- För att minska risken för substansackumulering över tid föreslås behandling av klarfasen från lamellförtjockare, exempelvis koagulering/filtrering eller ultrafiltrering. Allt förstafiltrat kan skickas i retur, men enbart en andel av dekanteringsvatten (resten bör ledas till avlopp).

Backspolvattnet ska hanteras noggrant på grund av dess kvalitet, vilken varierar beroende på varifrån det kommer (Eikebrokk m.fl. 2024). För att kontrollera och hantera risken för mikrobiell ackumulering vid returströmmar rekommenderas i rapporten olika åtgärder:

1. Beredningssteg:

Genomför mer eller mindre omfattande behandling, såsom koagulering/filtrering eller ultrafiltrering, för att förbättra vattenkvaliteten och minska risk för mikrobiell växt.

2. Fördröjning av returströmmar:

Säkerställ god fördröjning för att undvika stötbelastningar på vattenverket. Detta hjälper till att kontrollera mängden och kvaliteten på returvattnet som återvänder till behandlingsprocessen.

3. Massbalans-beräkning:

En enkel massbalans-beräkning kan vara ett verktyg för att styra blandningsförhållanden, mellan exempelvis förstafiltrat och klarfasvatten. Massbalansen ger underlag för att bedöma om ytterligare behandling behövs och för att övervaka effekterna av denna.

4. Mikrobiologisk övervakning med exempelvis DNA-sekvensering:

Mikrobiologisk övervakning rekommenderas, med exempelvis DNA-sekvensering för att övervaka sammansättningen av bakteriesamhällen. Data från sekvenseringen kan hjälpa till att identifiera patogener och bedöma förändringar i bakteriesammansättningen.

Grunden för att undvika förhöjd risk genom returströmmar är att det vatten som återförs ska ha minst samma kvalitet som ordinarie processvatten, och detta gäller även patogenhalter. I rapporten av Eikebrokk m.fl. (2024) rekommenderas behandling av returströmmarna, exempelvis med koagulering/filtrering. Massbalansmodeller kan användas för att avgöra krav

på rening samt lämpliga blandningsförhållanden². Vidare rekommenderas att följa specifika kvalitetskrav för att säkerställa att returvatten återinförs i vattenbehandlingsprocessen utan att försämra den totala vattenkvaliteten.

Även Australiens krav på returströmsbehandling kommenteras i rapporten. Dessa krav innebär att allt återcirkulerat vatten måste behandlas så att det inte ökar belastningen av protozoer (exempelvis *Cryptosporidium*) eller andra patogener. Det framhålls att halten i returvattnet inte får överskrida halten i inkommande vatten vid återföringspunkten. Det föreslås även att återförd volym hålls under ca 5–10 % av total inflödesmängd. Anläggningen som helhet måste uppfylla de hälsobaserade målen för log-reduktion av patogener (Eikebrokk m.fl. 2024).

3.2 Frågeställningar lamellsedimentering

Lamellsedimentering använder lutande plattor (lameller) inne i bassängen. Dessa skapar många korta sedimentationsvägar och ökar den effektiva sedimentationsytan kraftigt, jämfört med traditionell sedimentering. Lamellsedimentering som returströmsbehandling vore en praktisk lösning på det nya Görvålverket, det skulle avskilja eventuella restflockar i en kompakt anläggning.

Sedimentering i sig betraktas inte som en mikrobiologisk barriär av Livsmedelsverket, däremot kemisk fällning med efterföljande sedimentering och filtrering (Livsmedelsverket 2026). Det hindrar dock inte att lamellsedimenteringen i sig skulle kunna ge en viss log-reduktion, men eftersom avskiljningen baseras på gravitation av partiklar fordras att patogener i viss grad är bunden till flockar.

En begränsad litteraturstudie har genomförts med sökningar i Google Scholar och SwecoGPT (AI-stöd) för att besvara och kommentera följande två frågeställningar:

- Vilken log-reduktion kan lamellsedimentering åstadkomma av bakterier, virus och parasiter, inklusive variation över tid, och vilken påverkan kan enskilda riskhändelser medföra?
- Hur stor andel av patogener kan förväntas vara bundna till flockar och därmed möjlig att avskilja i lamellsedimentering, och hur skiljer det sig mellan bakterier, virus och parasiter?

3.3 Lamellsedimentering och patogenreduktion

Frågan om patogenreduktion på vattenverk var föremål för omfattande forskning i början av 2000-talet, i hög grad pådrivet av behov av underlag för QMRA. År 2008 presenterades i Nederländerna en doktorsavhandling på ämnet (Hijnen 2008). Där sammanställdes resultat från studier både i pilotskala och fullskala och för flera olika beredningssteg. Log-reduktionen studerades för bland annat konventionell behandling (fällning och filtrering), och för långsamfiltrering. Både virus (inklusive enterovirus och bakteriofager), bakterier (inklusive indikatorbakterier och *Campylobacter*) och bakteriesporer (inklusive *Clostridium* och *Bacillus*) ingick i beskrivningen, liksom de parasitära protozoerna *Cryptosporidium* och *Giardia*.

Som ett underlag till QMRA presenterades en litteraturöversikt av Hijnen och Medema (2007) vilken täcker in ett stort antal studier från perioden 1980 till 2005. Här redovisas bland annat log-reduktion över lamellsedimentering (LAM) i jämförelse med sedimentation i öppen dam eller i bänkskaleförsök (SED), flotation (DAF) samt sedimenteringsbassäng med slamtäck och rörlameller. Resultatdiagram från denna litteraturöversikt visas för virus, bakterier, *Cryptosporidium* och *Giardia* i Figur 1. Det ska påpekas att lamellsedimenteringen

² Simulink-modelleringen som genomförts för Görvålverket är exempel på en massbalansmodell.

- Virus avskiljs mellan 1,1 och 2,2 log, där de flesta och mest pålitliga studierna ligger omkring 2 log. Specifikt för enterovirus visade en studie att koagulering följt av lamellsedimentering avlägsnade 1,9 log medan koagulering följt av traditionell sedimentering endast avlägsnade med 0.6 log.
- Bakterier avskiljs mellan 0,6-1,9 log, dock var ingen av dessa studier baserad på avskiljning av patogena bakterier vilket innebar ett lägre FS-index (gråa staplar i stället för svarta). Bakteriesporer avskiljs mellan 0,8 och 1,5 log.
- *Cryptosporidium* avskiljs mellan 1-1,3 log, vilket enbart undersökts i två studier med relativt lågt FS-index (gråa staplar)
- *Giardia* avskiljs omkring 1,1 log, vilket enbart undersökts i en studie med relativt lågt FS-index.

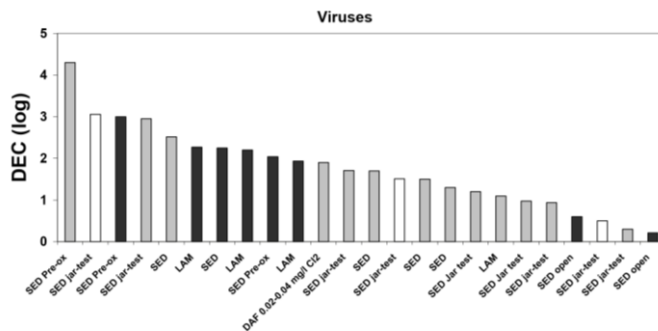


Figure 4.1 DEC of the coagulation and flocculation for viruses arranged in declining order (Black, grey and white bars: FS-index of 5, 4/3 and 2/1, respectively)

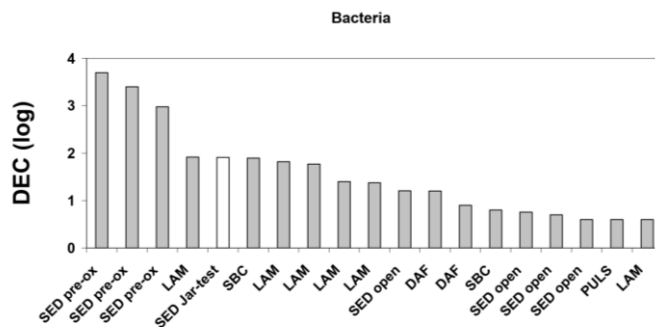


Figure 4.2 DEC of coagulation and flocculation for indicator bacteria arranged in declining order (coliforms, *E. coli*, enterococci and *Aeromonas* (DAF) (Black and white bars: FS-index of 5 and 2/1 respectively)

Figuren fortsätter på nästa sida

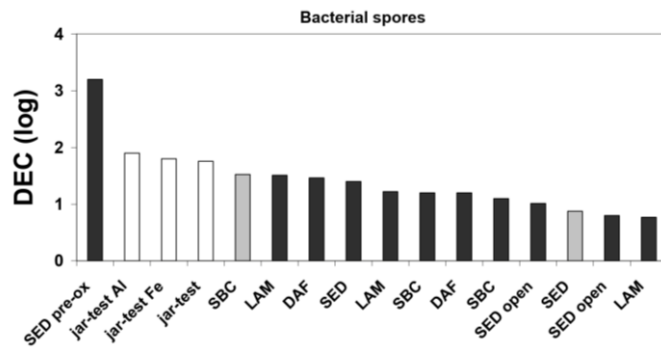


Figure 4.3 DEC of coagulation and flocculation for bacterial spores (spores of sulphite-reducing clostridia SSRC) arranged in declining order; (Black and white bars: FS-index of 5 and 2/1 respectively)

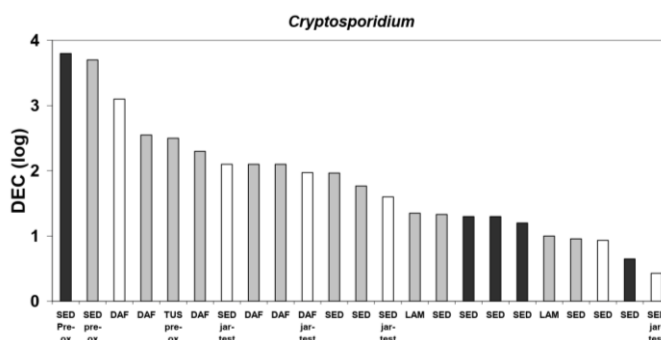


Figure 4.4 DEC of coagulation and flocculation for oocysts of *Cryptosporidium* arranged in declining order (Black, grey and white bars: FS-index of 5, 4/3 and 2/1 respectively)

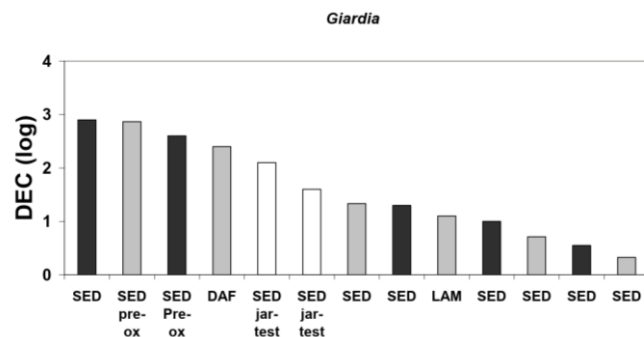


Figure 4.5 DEC of coagulation and flocculation for cysts of *Giardia* arranged in declining order (Black, grey and white bars: FS-index of 5, 4/3 and 2/1 respectively)

Figur 1. Log-reduktion över lamellsedimentering (LAM) i jämförelse med sedimentation i öppen dam eller i bänkskaleförsök (SED), flotation (dissolved air flotation, DAF), sedimenteringsbassäng med slamtäck (sludge blanket clarifier, SBC) och rörlameller (tube-settlers, TUB). Diagram från Hijnen och Medema (2007).

3.3.1 Driftförhållanden som påverkar

I samma rapport kommenteras även betydelsen av olika driftförhållanden (Hijnen & Medema 2007). En fullskale-studie med koagulering och fällning följt av lamellsedimentering (LAM) visade att avskiljningen av koliforma bakterier och clostridier var negativt korrelerad med vattentemperatur och turbiditet i det koagulerade vattnet. Det innebär att ju högre temperatur och ju högre turbiditet desto sämre avskiljning, dock var sambanden svaga. Det konstateras att typen av flockning påverkar log-reduktionen, där lamellsedimentering (LAM) avskilde mikroorganismer bättre än vanlig sedimentering.

Rapporten beskriver fällningskemikalier och polymer och dess effekt på log-reduktion genom (lamell)sedimentering. Detta kan sammanfattas på följande sätt:

1. Aluminium (Al):

Fällning med aluminium har bättre avskiljningskapacitet jämfört med järn under vissa förhållanden. Specifikt visade aluminium vid en koncentration av 6,5 mg/l högre effektivitet vid log-reduktion av koliforma bakterier och sulfit-reducerande clostridier (Coli44 och SSRC) jämfört med järn i samma koncentration.

Vidare nämns att vid höga koncentrationer av suspenderade ämnen, vilket typiskt kan förekomma vintertid, åstadkommer aluminium-baserade fällningskemikalier bättre log-reduktion tack vare ökad koagulationseffektivitet under dessa förhållanden. Här bör noteras att ingenting sägs om islagda sjöar, vilket kan förekomma vid Görvälverket.

2. Järn (Fe):

Fällning med järn gav också betydande log-reduktion. En jämförelse mellan järn- och aluminiumkoagulanter visade att järn kan vara något mer effektivt för att avlägsna *Cryptosporidium*-oocystor vid jämförbara koncentrationer.

För avskiljning av virus (poliovirus och hepatit A) visade järn god effekt, även om aluminium i vissa studier visade högre effektivitet vid optimerade doser.

3. Polymer:

Tillsättning av katjoniska polymerer har visat sig förbättra log-reduktionen av mikroorganismer. Studier av Nasser m.fl. (1995) visade att förekomsten av polymer, kombinerat med fällning med aluminium eller järn, ökade log-reduktionen för MS2-fager och hepatit A-virus.

Aluminium verkar alltså ge en något högre verkningsgrad under förhållanden med hög grumlighet och suspenderade ämnen. Användningen av polymerer ökar ytterligare effektiviteten hos dessa koagulanter.

Sammanfattningsvis är lamellsedimentering hydrauliskt mer effektiv, men ger inte högre log-reduktion än konventionell sedimentering. Lamellsedimentering gör processen mer kompakt, inte biologiskt "bättre". Den är således knappast att betrakta som ett reningssteg i sig, men kan i kombination med fällning och/eller polymertillsats ge en log-reduktion så som beskrivits ovan.

3.3.2 Andel patogener bundna till flockar/partiklar

Internationellt föreslagna antaganden om olika patogeners flockbundenhet visas i Tabell 6. Antagandena gäller råvatten eller rejektvatten efter koagulering (fällning/filtrering), där flockrester finns kvar. I brist på lokala studier kan detta antas gälla även flockbundenheten vid fällning på ultrafilter.

Tabell 6. Typiska antaganden för flockbundenhet av olika patogengrupper. Antagandena gäller råvatten eller rejektvatten efter fällning/filtrering, där flockrester finns kvar. Tabellen framtagen med stöd av SwecoGPT.

Patogengrupp	Andel flock-/partikelbundenhet	Typiska antaganden
Bakterier	ca 50-90 %	70 %
Protozoer (Giardia, Cryptosporidium)	ca 70–95 %	90 %
Virus	ca 0–20 % (ofta <10 %)	0 eller 10 %

I Guidelines for Drinking-water quality framhåller WHO att bakterier och protozoer ofta är associerade med partiklar, medan virus huvudsakligen förekommer fritt i vattenfasen (WHO 2017). Eftersom virus är mycket små ($\approx 0,02\text{--}0,1\ \mu\text{m}$) är de ofta fritt dispergerade i vattnet, snarare än bundna till partiklar. Därför har virus lägre avskiljning i sedimentation och enkel filtrering och är mer beroende av adsorption till flockar för att kunna avlägsnas effektivt vid koagulering/filtrering. Detta återspeglas i att kemisk fällning, sedimentering och filtrering, liksom andra partikelbaserade processer, ofta ger lägre log-reduktion för virus än för bakterier och protozoer.

Bakterier ($\approx 0,5\text{--}5\ \mu\text{m}$) är oftare partikelbundna och/eller tillräckligt stora för att följa med flockar och fastna i filter, vilket ger högre avskiljning i partikelavskiljande steg. Protozoer såsom *Giardia* och *Cryptosporidium* ($\approx 4\text{--}20\ \mu\text{m}$) är stora partiklar i sig själva och därmed i hög grad avskiljbara genom koagulering, sedimentation/flotation och filtrering. WHO anger konsekvent högre fysiska avskiljningsgrader för protozoer än för virus (WHO 2017).

Även i Guidelines for Canadian Drinking Water Quality framhålls att protozoer som *Giardia* och *Cryptosporidium* i hög grad är partikelbundna, vilket motiverar viss avskiljning i sedimentering (Health Canada 2012).

Få studier tycks ha genomförts för att studera hur mikroorganismer och specifik patogener är bundna till partiklar. En studie bedömde egenskaperna och förändringarna i de suspenderade partiklarna och de associerade bakterierna i oklorerat vatten från olika täkter i distributionssystem med dess olika reservoarer. Resultaten visar att partikelassocierade bakterier (PAB) fanns på en nivå av $0,8\text{--}4,5 \times 10^3$ celler/ml med en biologisk aktivitet på $0,01\text{--}0,04\ \text{ng l}^{-1}$ ATP (Liu m.fl. 2016).

3.4 Exempel på försök att göra

Litteraturöversikten pekar mot att graden av partikelbundenhet är av betydelse för vilken patogen-reduktion som sedimentering, i detta fall lamellsedimentering, kan åstadkomma. Detta skulle kunna studeras platsspecifikt, i bänkskala, pilotskala eller i fullskaleförsök.

Försök skulle kunna genomföras med spårorganismer eller partiklar som motsvarar bakterier (exempelvis *E. coli*), parasitära protozoer (eventuellt mikrosfärer) respektive virus (exempelvis fager såsom MS2-fager eller PRD-1.). På bänkskala skulle graden av flockbundenhet indirekt kunna studeras i fällningsförsök. Exempelvis skulle en blandning av råvatten med tillsatta mikroorganismer kunna studeras med olika dos av fällningskemikalie. Uttag av prov från olika djup i bägare/kolonner och efter olika tidpunkter och analyserna skulle indikera var mikroorganismerna hamnat: i fri fas eller bundits till partiklar/sedimenterat.

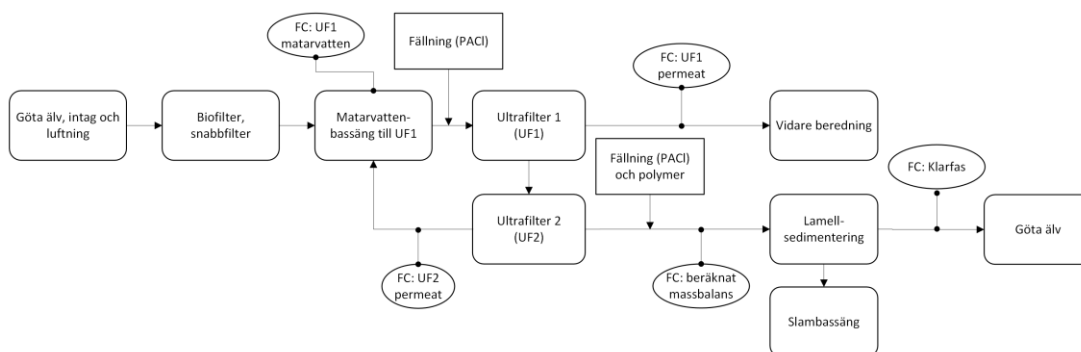
4 Bakterieavskiljning i liknande anläggning

På Kungälv's vattenverk finns en liknande process som den som planeras vid nya Görvälverket. Ett förenklat processchema för valda delar av beredningen visas i Figur 2. Fällning sker på ultrafilter UF1 genom tillsatts av PACl (polyaluminiumklorid) ca 2 mg/L Al^{3+} vid pH ca 7. Permeatet går till vidare beredning medan retentatet leds till ett andra ultrafilter, UF2. Från detta leds permeatet åter till matarvattenbassängen. Till spolvattnet från UF2 tillsätts polymer och PACl (ca 1-2 mg Al/L + 2-3 mg/L polymer) innan det leds till lamellsedimentering.

Med komponenterna ultrafilter, fällning med PACl och lamellsedimentering finns flera paralleller till vad som planeras vid nya Görvälverket. Nya Görvälverket kommer även att ha motsvarande halt av suspenderat material i backspolvattnet från UF1 som backspolvattnet från UF2 har i Kungälv. Detta gör Kungälv till en relevant referensanläggning att ta prover vid, även om Kungälv inte har den exakta processkonfigurationen som det framtida vattenverket kommer att ha. Där kommer det dock inte vara aktuellt med polymerdosering, såsom i Kungälv, eftersom klarfasen återförs till råvattnet och akrylamid som finns i polymeren skulle då riskera att nå dricksvattnet.

4.1 Material och metod

Provpunkterna vid Kungälv's vattenverk valdes i syfte att undersöka vilken log-reduktion av bakterieceller som returströmsbehandling med lamell-sedimentering kan åstadkomma. Provpunkterna för analys med flödescytometri är markerade i Figur 2. Halten före lamellsedimentering beräknades med massbalans, utifrån uppmätta halter i UF1 matarvatten, UF1 permeat samt UF2 permeat och kända uppgifter om flöden som passerar vid dessa punkter ($m^3/dygn$).



Figur 2. Provpunkter för mätning med flödescytometri (FC) vid Kungälv's vattenverk.

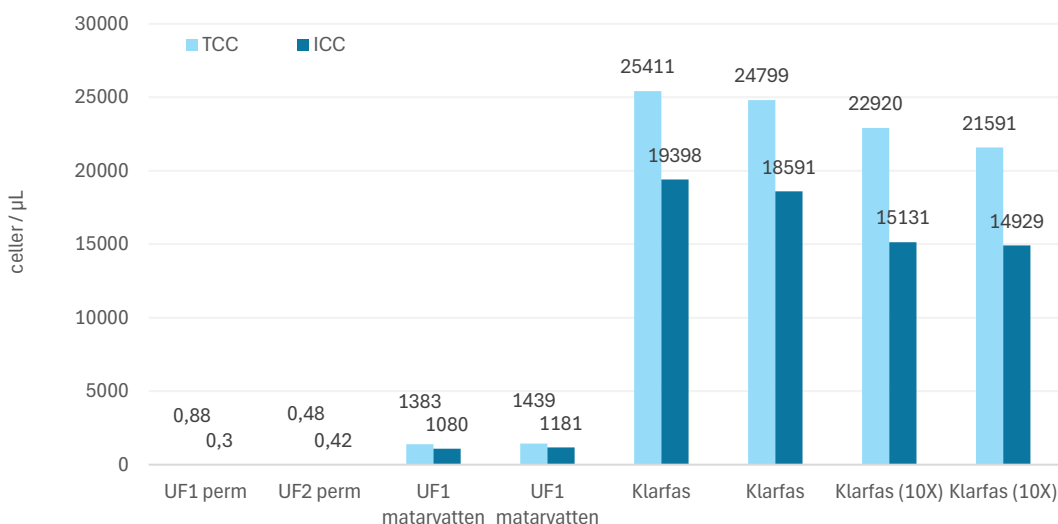
Provtagning genomfördes vid Kungälv's vattenverk förmiddagen den 9 juni 2026. Prover transporterades kylt till Norrvattens laboratorium där flödescytometrianalys genomfördes dagen efter.

4.2 Analyser med flödescytometri

Analys genomfördes med BD Accuri C6 plus av det totala cellantalet (TCC; total cell count) och antalet intakta celler (ICC; intact cell count). Svar ges även av andelarna av celler med högt respektive lågt DNA-innehåll (HNA/LNA; high/low nucleic acid content). Resultat gavs i enheten antal celler per mikroliter (μl). Klarfasen analyserades med 10 gångers spädning då mättnad ledde till att det ospädda provet inte kunde analyseras med samma analysvolym.

4.3 Resultat

Halter av totalantalet celler och intakta celler vid valda punkter på Kungälvsvattenverk, bestämda med flödescytometri efter provtagning den 9 juni, visas i Figur 3.



Figur 3. Halter av totalantalet celler (TCC) och Intakta celler (ICC; intact cell count) bestämda med flödescytometri efter provtagning den 9 juni på Kungälvsvattenverk.

Underlag och resultat från massbalansberäkningar avseende log-reduktion över lamell-sedimenteringen vid Kungälvsvattenverk visas i Tabell 7. Log-reduktionen som beräknats till 0,6 avser den samlade effekten av fällning med PACl och tillsättning av polymer följt av lamellsedimentering.

Tabell 7. Underlag och resultat från massbalansberäkningar avseende log-reduktion över lamell-sedimenteringen vid Kungälvsvattenverk. Här används intakta celler (ICC; intact cell count) som surrogat för bakterieceller. Värden som används i log-reduktionsberäkningen samt beräknad log-reduktion är fetmarkerade.

Provpunkt	ICC (celler/μL)	Flöde (m ³ /dygn)	ICC (celler/dygn)	Log IC	Andra parametrar	Log-reduktion
Mätningar:						
UF 1 permeat	0,30	10368	3,11E+12	12,5		
UF 1 matarvatten	1130	10420	1,18E+16	16,1		
UF 2 permeat	0,42	1042	4,38E+11	11,6		
Klarfas	18995	152	2,90E+15	15,5	Turb. 2,9 NTU	
Beräkningar:						
Lamell inkommande	77223	152	1,18E+16	16,1	TSS 175 mg/l	0,6

4.4 Tillämpning på Görvälnverket

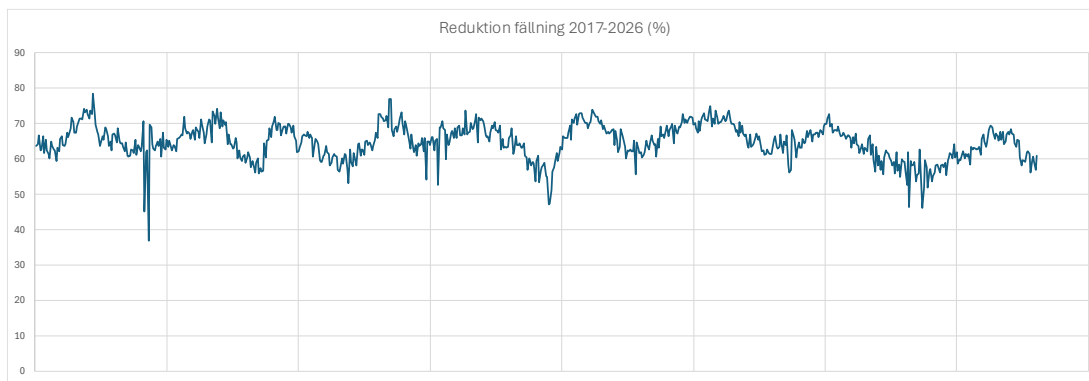
En log-reduktion av 0,6 på Kungälvsvattenverk med beredningen fällning – polymerdosering – lamellsedimentering ligger väl i linje med vad Hijnen (2008) rapporterar vad gäller log-reduktion av bakterier i motsvarande process (mellan 0,6-1,9 log; bakteriesporer mellan 0,8 och 1,5 log). Det ska framhållas att log-reduktion av totalantalet bakterier inte ger ett tillförlitligt generellt mått på log-reduktion av patogener; särskilt virus riskerar att avskiljas i lägre grad än så.

Reduktion i totalt cellantal (TCC) över kemisk fällning, sedimentering och snabbfiltrering, uppmätt med flödescytometri på det befintliga Görvälnverket visas i Figur 4. Mätningarna

visas här för perioden 2017-2026, utan datumetiketter. Figuren antyder en baslinje på drygt 60 % reduktion, dock varierande över året. Medelvärde är 64,5 % (min 36,8- max 78,5 %).

Resultatet från stickprovtagningarna i Kungälv i juni, med 0,6 logs reduktion, ligger i linje med långtidsmätningar av TCC-reduktionen över det nuvarande kemfällningssteget på Görvälnverket (Figur 4). Reduktionen i TCC varierade över kemisk fällning (med PACl), sedimentering, med i medeltal omkring 60 % reduktion. En 60 % reduktion motsvarar ca 0,4 logs reduktion, vilket är något lägre än vad Kungälvs-exemplet visade.

QMRA-modelleringarna har visat en acceptabel hälsorisk även om returströmsbehandlingen begränsas till enbart slamavskiljning (se 2.3.2). En log-reduktion därutöver, vilket är vad returströmsbehandling baserad på kemisk fällning och lamellsedimentering kan väntas åstadkomma, blir således en bonus som minskar hälsorisken något. Liksom TCC-reduktionen varierat historiskt över kemfällningssteget på nuvarande vattenverk, kan en variation över tid väntas även över denna typ av returströmsbehandling.



Figur 4. Reduktion i totalt cellantal (TCC) över kemisk fällning, sedimentering och snabbfiltrering, uppmätt med flödescytometri på det befintliga Görvälnverket.

5 Slutsatser och rekommendationer

Denna studie kan sammanfattas i följande slutsatser och rekommendationer:

1. En omfattande returströmsbehandling (alternativ A) förbättrar inte hälsosäkerheten i utgående dricksvatten mer än den typ av behandling som endast säkerställer att nivåerna i returströmmen inte överskrider råvattnets (alternativ B).
2. Enbart slamavskiljning i returflödet (alternativ C) minskar den totala log-reduktionen med ca 0,8 log vilket ökar hälsorisen med 5-7 gånger jämfört med en behandling som säkerställer att nivåerna i returströmmen inte överskrider råvattnets (alternativ B). Enbart slamavskiljning i returflödet (alternativ C) ger ändå en hälsosäkerhet i utgående dricksvatten som är betryggande låg; minst 3-4 log-enheter under internationella riktvärden för daglig och årlig infektionsrisk samt DALY.
3. Ingen returströmsbehandling alls (alternativ D; inte aktuellt) minskar log-reduktionen med ca 1,6 log och ökar risken 30-46 gånger jämfört med en behandling som säkerställer att nivåerna i returströmmen inte överskrider råvattnets (alternativ B).
4. Även utan monokloramin, vars log-reduktion är generellt låg och som inte planeras i den förenklade processen, klaras internationella riktvärden för daglig och årlig infektionsrisk samt DALY, även med returströmsbehandlingsalternativen C och D.
5. Det befintliga Görvälverket har en log-reduktion som är lägre än vid alla alternativ till returströmsbehandling på det framtida vattenverket: minst ett par log-enheter lägre än vid helt utebliven returströmsbehandling (alternativ D). Det visar att det nya verket innebär en förstärkning av den mikrobiologiska barriärverkan i dricksvattenproduktionen, oavsett vilken typ av returströmsbehandling som väljs.
6. Litteraturen visar att lamellsedimentering såsom fristående beredningssteg inte är en mikrobiologisk barriär, men kan i kombination med föregående fällning ändå ge en viss reduktion av bakterier (ca 0,6-1,9 log), virus (ca 1-2 log, lägre säkerhet) och av protozoer (*Giardia* och *Cryptosporidium* ca 1-1,3 log). Denna beredningskedja är därför användbar som returströmsbehandling.
7. Litteraturen visar att log-reduktionen vid fällning följt av lamellsedimentering starkt beror på flockbundenhet (hög för protozoer, låg för virus), fällningskemikalie (aluminium ofta bättre än järn), eventuell polymerdosering och driftförhållanden.
8. Mätningar vid ett tillfälle i Kungälvsvattenverk visar att returströmsbehandling med beredningskedjan fällning – polymertillsättning – lamellsedimentering ger ca 0,6 log i reduktion av intakta bakterieceller, baserat på analys med flödescytometri. Detta ligger i linje med vad litteraturen visar.
9. Utredningen visar sammantaget att det inte är nödvändigt att behandla returvattnet med en hög log-reduktion för att uppnå acceptabel hälsosäkerhet i utgående dricksvatten. Enbart slamavskiljning, eventuellt kompletterad med fällning och lamellsedimentering, ger en betryggande låg hälsorisk och tillgodoser de mikrobiologiska kvalitetskraven för det nya verket (7b, 7v och 5,5p).

6 Referenser

Chalmers (2026) QMRA: wiki för QMRA-verktyget. <https://wiki.qmra.se/doku.php>.

Eikebrokk, B., Wennberg, A. C., Hageskal, G., Myrmel, M., Pellikainen, P. H., Lea, U. S. & Brandt, J. (2024) *Vannbehandlingsbarrierer, vannverkslam og returstrømmer – Resultater fra spleiselagsprosjektene BARRiNOR og SLAMiNOR*. I 289/2024, R. (Red.) Hamar, Norge. Norsk Vann: 174 sidor.

Fridén, H. (2025) *Konsult, IVL*. Word-fil "QMRA 251211" samt e-post från Håkan Fridén 2025-12-15.

Fridén, H., Rahmberg, M. & Åström, J. (2025) *Modellering av patogenflöden i Görvälnverkets utbyggnad, del 2. Rapport U11081, november 2025*. IVL i samarbete med Tyréns, Kommunalförbundet Norrvatten. 24 sidor.

Health Canada (2012) *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document - Enteric Protozoa: Giardia and Cryptosporidium*. Health Canada. sidor.

Hijnen, W. & Medema, G. J. (2007) *Elimination of micro-organisms by water treatment processes: a review*. 152 sidor.

Hijnen, W. (2008) *Elimination of micro-organisms in water treatment*. Diss., Kiwa Water Research. Delft. Delft University of Technology.

Liu, G., Ling, F. Q., van der Mark, E. J., Zhang, X. D., Knezev, A., Verberk, J. Q. J. C., van der Meer, W. G. J., Medema, G. J., Liu, W. T. & van Dijk, J. C. (2016) Comparison of Particle-Associated Bacteria from a Drinking Water Treatment Plant and Distribution Reservoirs with Different Water Sources. *Scientific Reports*, vol. 6: 1, ss. 20367.

Livsmedelsverket (2026) *Mikrobiologiska säkerhetsbarriärer. Livsmedelsverkets Kontrollwiki, Dricksvatten*. Uppsala. Livsmedelsverket: <https://kontrollwiki.livsmedelsverket.se/artikel/339/mikrobiologiska-sakerhetsbarriarer>.

Lundwall, T., Fridén, H., Rahmberg, M. & Åström, J. (2023) *Modellering av patogenflöden i Görvälnverkets utbyggnad. NV Rapport U6665, januari 2023*. IVL i samarbete med Tyréns, Kommunalförbundet Norrvatten. 24 sidor.

Nasser, A., Weinberg, D., Dinoor, N., Fattal, B. & Adin, A. (1995) Removal of hepatitis A virus (HAV), poliovirus and MS2 coliphage by coagulation and high rate filtration. *Water science and Technology*, vol. 31: 5-6, ss. 63-68.

Signor, R. S. & Ashbolt, N. J. (2009) Comparing probabilistic microbial risk assessments for drinking water against daily rather than annualised infection probability targets. *J Water Health*, vol. 7: 4, ss. 535-543.

Tyréns (2020) *PM GörvälInverket QMRA-modell 2020*. Kommunalförbundet Norrvatten. 31 sidor.

Tyréns (2024) *QMRA-modellering av ny beredningsprocess på GörvälInverket. Slutrapport 2024-07-10*. Kommunalförbundet Norrvatten. 34 sidor.

WHO (2017) *Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum*, Geneva, World Health Organization. Tillgänglig: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/ (2025-12-04) 541.

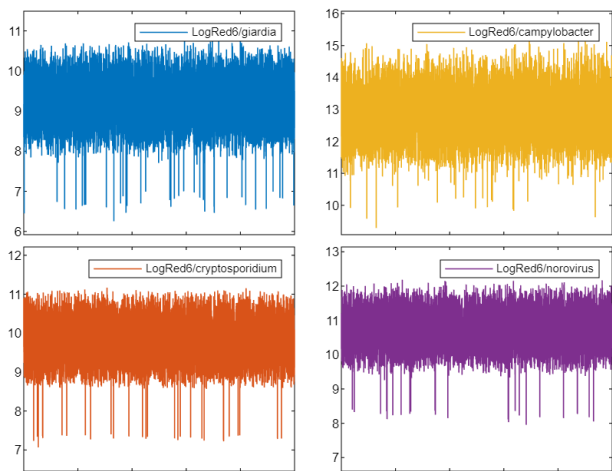
Åström, J. (2018) *Patogenhalter i svenska ytvattentäkter för QMRA – statistisk modellering och utvärdering av ett hypotesbaserat angreppssätt*. Svenskt Vatten Utveckling rapport nr. 2018-3. Stockholm. Svenskt Vatten. Tillgänglig: <http://vav.griffel.net/vav.htm> (2018-05-20): 56 sidor.

Bilaga 1: Effekt av olika nivå av returflödesbehandling

Simulink-simuleringar av IVL (Fridén 2025). Log-reduktionen anges i tabeller som medianvärde (50-percentil), Cilow (1-percentil) och Cihigh (99-percentil).

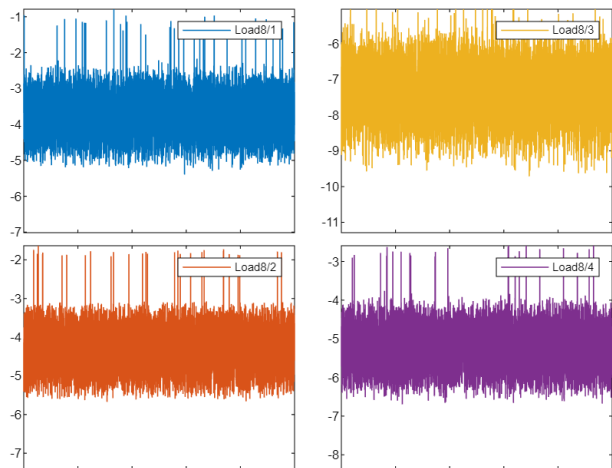
A. Ursprunglig konfiguration (5,45 log)

Total log-reduktion över vattenverket:



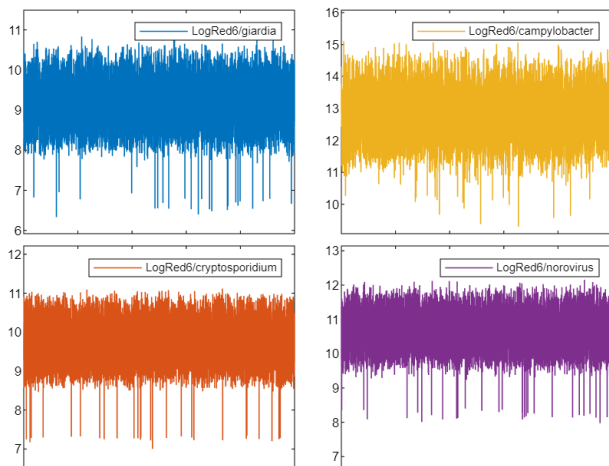
UV	254790 [m3/d]				
	ga	cr	ca	no	
median	9.1591	9.7265	12.8126	10.6241	
Cilow	7.9643	8.6434	11.194	9.5263	
Cihigh	10.46	10.9214	14.5762	11.8687	

Halt (log) strax efter UV-steget:



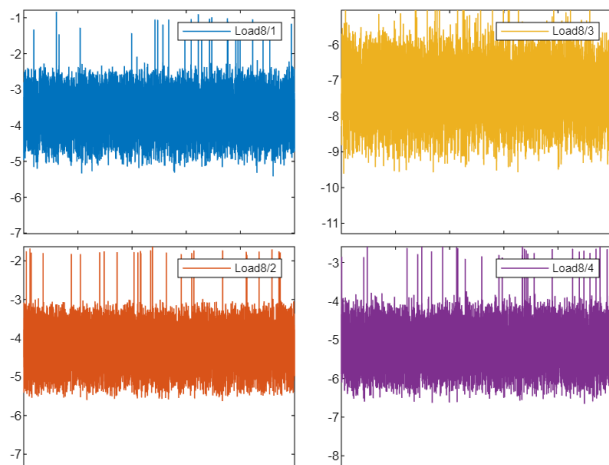
B. Returflödet renas till samma halter som i råvattnet (0,915 log)

Total log-reduktion över vattenverket:



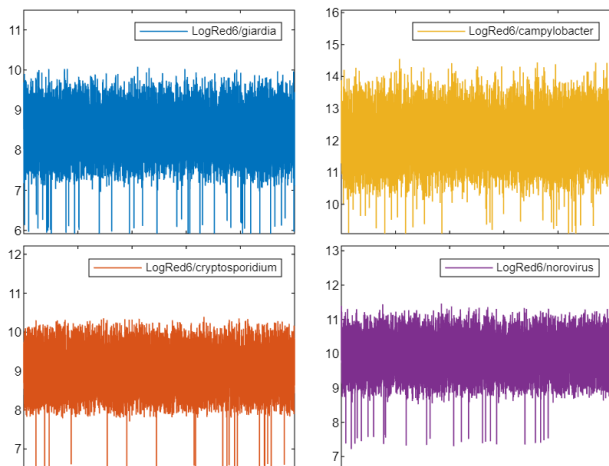
MF2 logred = 0.915				
	ga	cr	ca	no
median	9.111	9.6774	12.7424	10.5902
Ci low	7.915	8.603	11.0923	9.4024
Ci high	10.4265	10.8691	14.5369	11.8133

Halt (log) strax efter UV-steget:



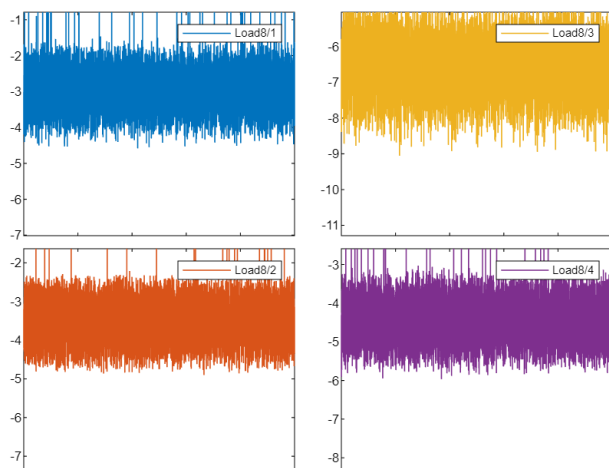
C. Ingen behandling utöver avskiljning via slamfasen

Total log-reduktion över vattenverket:



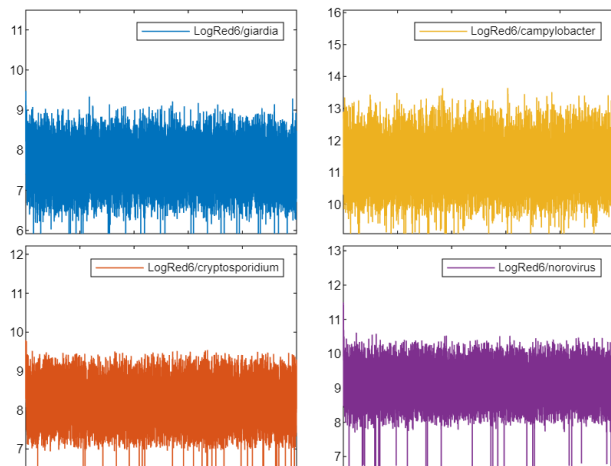
MF2-logRed = 0.0				
	ga	cr	ca	no
median	8.3914	8.9545	12.0201	9.8607
Cilow	7.1892	7.888	10.3779	8.772
Cihigh	9.6879	10.179	13.7982	11.1189

Halt (log) strax efter UV-steget:



D. Ingen behandling eller avskiljning

Total log-reduktion över vattenverket:



Utan MF2	ga	cr	ca	no
median	7.5639	8.1286	11.1613	9.0337
Cilow	6.3558	7.0386	9.5448	7.9334
Cihigh	8.8605	9.3246	12.9304	10.2492

Halt (log) strax efter UV-steget:

