Handledande exempel till QMRA- verktyget

1. Inledning

Som ett stöd för användaren vid genomförande av mikrobiologisk riskanalys med QMRA- verktyget ges i det följande ett antal exempel. Exemplen utgår från samma fiktiva ytvattenverk, Grönköpings vattenverk, som återfinns i exempelkapitlet i *”Introduktion till Mikrobiologisk BarriärAnalys, MBA” (SVU- publikation P112)*. Normalförhållandena för Grönköpings vattenverk är desamma som i P112, men med de patogenhalter i råvattnet som anges i *”MRA – Ett modellverktyg för svenska vattenverk” (SVU- rapport nr 2009-05)*. Det ska understrykas att dessa patogenhalter inte är att betraktas som standardvärden, och att varje råvatten har sina egna patogenhalter beroende på spridningskällor uppströms. Såväl patogenhalter som reduktion över olika beredningssteg bör väljas så överensstämmande som möjligt med det vattenverk som är föremål för en QMRA. För andra exempel på patogenhalter i svenska ytråvatten hänvisas till *”Handbok Dricksvattenrisker. Mikrobiologiska risker i ytråvatten”* från Livsmedelsverket (2016).

2. Grönköpings vattenverk

Vattenproduktion

Grönköpings vattenverk är dimensionerat för att kunna producera 30 000 m^3 vatten/dygn, vilket motsvarar 100 000 personer. I dag distribueras vatten till 48 000 personer från vattenverket, vilket motsvarar ca 14 000 m^3 vatten/dygn.

Beredningsprocess

Råvatten till Grönköpings vattenverk tas från Älven, uppströms staden. Beredningsprocessen är uppbyggd enligt:

Råvatten → Silstation → Kemisk fällning → Sedimentering → Snabbfiltrering → Långsamfiltrering → Desinfektion (Natriumhypoklorit) → Lågreservoar → Distribution

Beredningsprocessen börjar med en silstation med roterande silar. På den till vattenverket inkommande råvattenledningen doseras sedan kalk och koldioxid för att höja vattnets hårdhet och alkalinitet. Därefter doseras fällningskemikalie till vattnet innan det fördelas över sex stycken flockningsbassänger. Uppbyggda flockar avskiljs med sedimentering. Vattnet passerar sedan sex stycken snabbfilter (belastning 3,3 m/h vid dagens medelflöden). Därefter pH-justeras vattnet med natriumhydroxid till pH 8,2 innan det går till fyra stycken långsamfilter. För att säkerställa god flockningskvalitet mäts pH on-line i början av flockningen och hålls konstant med hjälp av justering av kalkvattendosen. Dosen fällningskemikalie styrs av råvattnets turbiditet. Förutom i råvattnet, mäts turbiditeten på det sammanslagna snabbfiltrerade vattnet, samt på utgående dricksvatten. Som komplement till turbiditetsmätningarna kontrolleras fällningseffektiviteten tre gånger i veckan genom

mätning av färgtal och UV-absorbans i samma punkter som turbiditeten, justeringar görs vid behov.

Turbiditeten efter snabbfiltreringen är <0,1 FNU som medel, fler än 10 % av proverna är >0,1 FNU. Råvattenpumparna stoppar automatiskt vid strömsvikt eftersom det inte finns reservkraft. Vattenverket är dock byggt med självfall genom beredningsprocessen och vid strömsvikt fortsätter vattnet att rinna genom verket till dess att handmanövrerade ventiler stängs för att t.ex. undvika torrläggning av snabbfilter och långsamfilter.

Klordosen är 0,5 mg Cl_2/l. Halten totalt klor mäts on-line på utgående dricksvatten efter reservoaren. Felaktig halt innebär larm med manuell åtgärd. Reservoarens nivå varierade under vecka 8, 2011 mellan 3,7–4,1 m. Vid 4,1 m är reservoaren full och volymen är då 2 000 m^3. Dock erhålls lägst uppehållstid vid den lägsta nivån vilket motsvarar en volym på 1 800 m^3. Reservoaren är rektangulär, d.v.s. den har ett högt längd/bredd-förhållande och den är försedd med ett flertal skärmväggar. Den hydrauliska faktorn t10/T är bedömd till 0,6.

Råvattenkvalitet

Vattenvårdsförbundet utför kontinuerlig mätning i Älven, inte långt från råvattenintaget till Grönköping vattenverk. Turbiditet, konduktivitet och pH mäts on-line. Vid onormala värden i Älven kontaktar Vattenvårdsförbundet personal vid Grönköping vattenverk.

Vid Grönköping vattenverk har endast Escherichia coli (EC) analyserats återkommande (1 gång/vecka) de senaste tre åren. Medelvärdet för EC ligger på 16 cfu/100 ml. Av de 168 analyserade proverna under provtagningsperioden var 62 st ≥10, detta motsvarar drygt 1/3 av proverna.

Då patogener inte analyserats används de standardvärden som anges i *”MRA – Ett modellverktyg för svenska vattenverk” (SVU- rapport nr 2009-05)*, enligt tabell 1 nedan:

Tabell 1. Förekomst av patogener i ytvatten. (SVU- rapport nr 2009-05).

Patogen	**Halt (antal/liter)**
Campylobacter	1
Salmonella	1
E. coli O157	0,1
Rotavirus	Lognormal (mean = 1, stddev = 3)
Norovirus	1
Adenovirus	1
Cryptosporidium	Lognormal (mean = 0,4, stddev = 2,1)
Giardia	0,5

Dricksvattenkvalitet

I dricksvattenproverna analyseras COD och medelvärdet för perioden oktober 2008 t.o.m. februari 2011 var 1,6 mg/l. Utifrån detta värde har det för Grönköping uppskattats att TOC-halten varit 1,5 mg/l under samma period. Sambandet mellan COD och TOC varierar mellan olika vatten och bör säkerställas med hjälp av analyser som inkluderar flödes- och årstidsvariationer.

Dricksvattnets pH är 8,2 och temperaturen kan periodvis vara nere i 0,5° C.

3. Exempel

3.1 Exempel 1 – Normal drift

I detta exempel modelleras normal drift av vattenverket och normal råvattenkvalitet under hela året.

Observera att alla decimalavgränsningar ska anges med punkt (.).

3.1.1 Karaktärisering av råvatten

Gå in på den första fliken i QMRA, *Source Water Characterisation*, och fyll i patogenhalter i enlighet med tabell 1, se figur 1.

	Point estimate or distribution?	Single value:	If distribution, add parameter values:		
Campylobacter data	Point estimate (single value)	1	0	0	0
Salmonella data	Point estimate (single value)	1	0	0	0
E. coli O157 data	Point estimate (single value)	0.1	0	0	0
Rotavirus data	LogNormal (mean stddev)	1	1	3	0
Norovirus data	Point estimate (single value)	1	0	0	0
Adenovirus data	Point estimate (single value)	1	0	0	0
Cryptosporidium data	LogNormal (mean stddev)	1	0.4	2.1	0
Giardia data	Point estimate (single value)	0.5	0	0	0

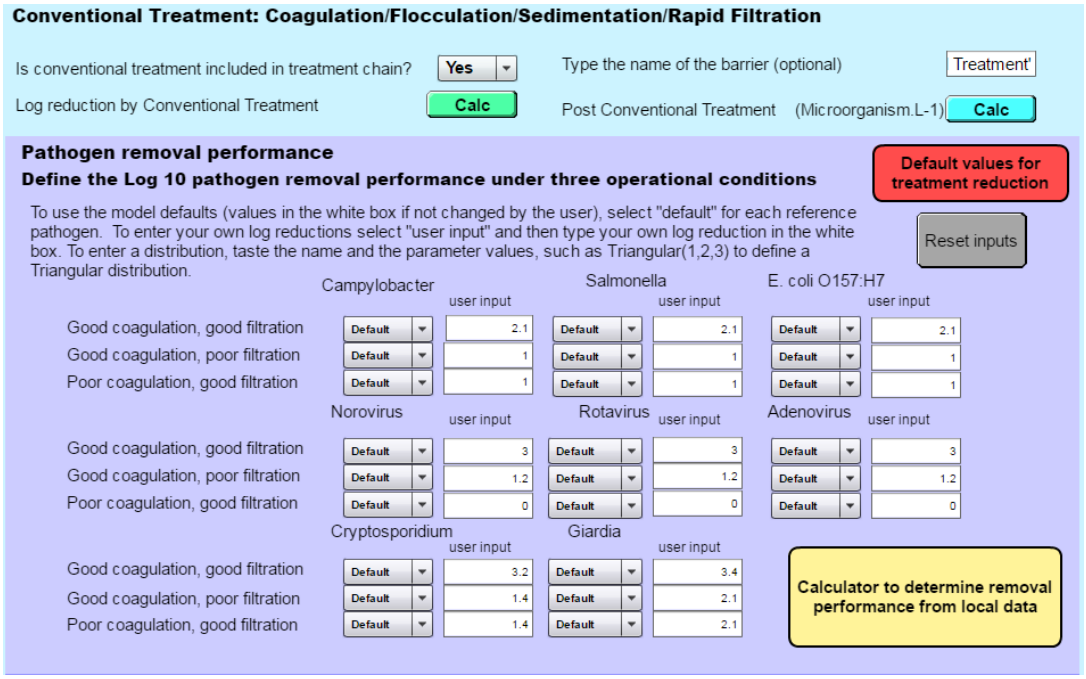
Figur 1. Karaktärisering av råvatten.

3.1.2 Beskrivning av beredningsprocessen

I detta steg ska vattenverkets beredningssteg och hur väl dessa fungerar beskrivas.

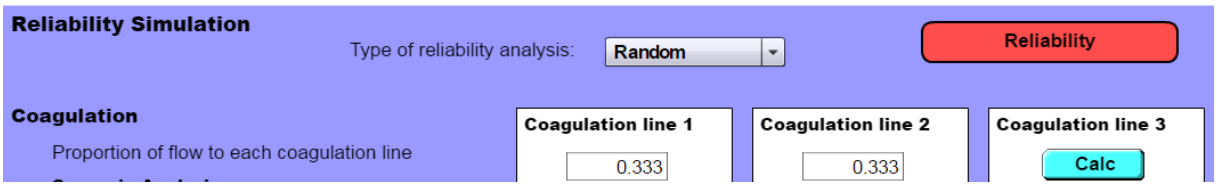
Konventionell rening
Gå in på fliken *Conventional Treatment Performance*.

Välj ”YES” på frågan om konventionell rening ska ingå i beredningsprocessen. Då vi här ska simulera normal drift använder vi verktygets förinlagda standardvärden (default) för log-reduktion, se figur 2.



Figur 2. Konventionell kemfällning

I QMRA kan man välja tre fällningslinjer medan Grönköpings vattenverk har sex fällningslinjer. Vi börjar med att ange flödesfördelningen till respektive linje. Eftersom det inte går att exakt dela upp flödet på tre linjer (flödet per linje blir 0,3333…..), så väljer vi att ange andelen av flödet till linje 1 som 0,333 och till linje 2 som 0,333. Summan av flödesfördelningen måste bli 1. Genom att klicka på Calc erhålls andelen av flödet till linje 3, i det här fallet 0,334.

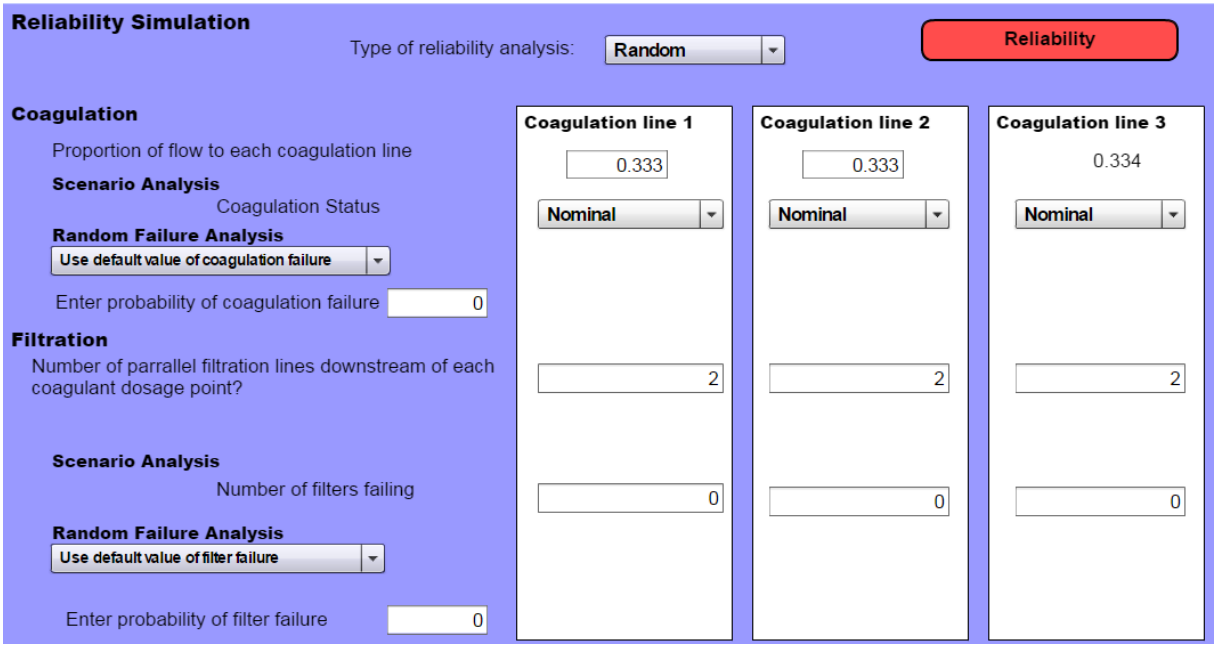


Figur 3. Reliability simulation

För att hantera sex linjer istället för, som i QMRA, tre linjer anger vi för varje linje att det finns två snabbsandfilter (3 linjer*2 snabbsandfilter = 6 snabbsandfilter totalt), se figur 3. Då detta exempel avser normaldrift av vattenverket väljs analystypen (*Type of reliability analysis*) ”Random”. Under ”Random Failure Analysis” för den kemiska

fällningen (*Coagulation*) respektive snabbsandfiltren (*Filtration*) väljs att defaultvärden ska användas för hur väl dessa beredningssteg fungerar (*Use default value of coagulation failure/filter failure*), se figur 3. Default-inställningen för fällning och snabbfiltrering är att de antas ha bristande funktion under 1 % av tiden, dvs sannolikheten för filtergenombrott antas vara 0,01.

Observera att rutor tillhörande *Scenario Analysis* inte används i det här exemplet, det spelar således ingen roll vad som står där.

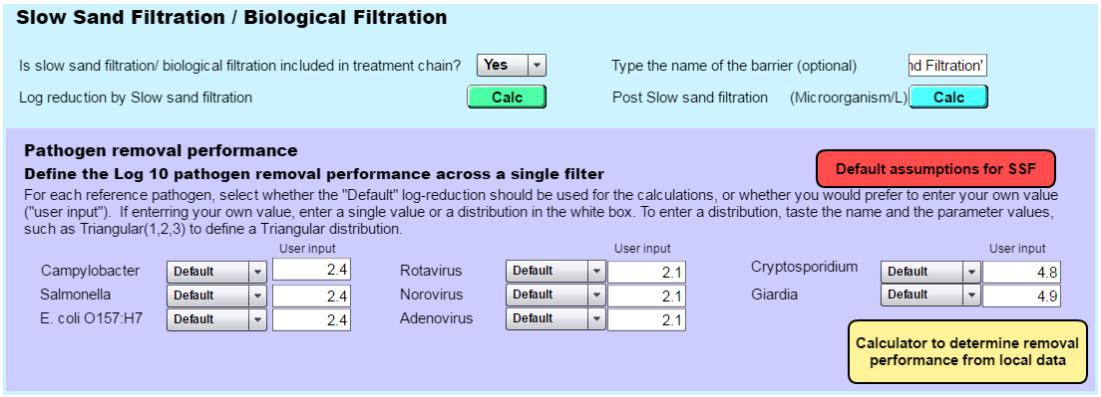


Figur 3. Val av simuleringsmetod och beskrivning av den konventionella reningen.

Långsamfiltrering

Gå in på fliken *Slow Sand Filtration/Biological Filtration*.

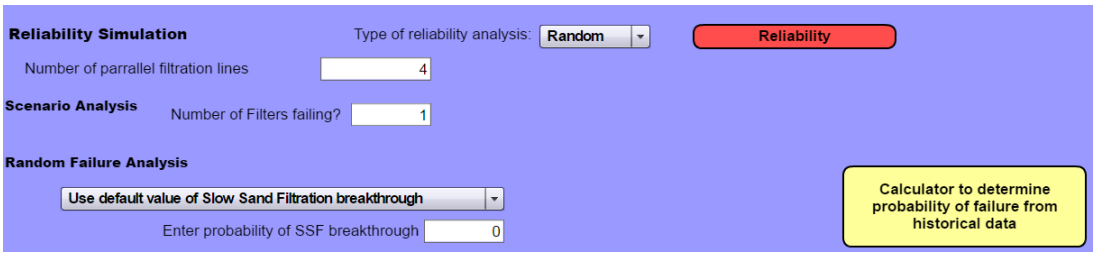
Välj ”YES” på frågan om långsamfiltrering ska ingå i beredningsprocessen. Då vi här ska simulera normal drift använder vi verktygets förinlagda defaultvärdena för log-reduktion, se figur 4.



Figur 4. Långsamfilter

Grönköpings vattenverk har fyra långsamfilter. Då detta exempel avser normaldrift av vattenverket väljs analystypen (*Type of reliability analysis*) ”Random”. Under ”Random Failure Analysis” väljs att defaultvärden ska användas för hur väl detta beredningssteg fungerar (*Use default value of Slow Sand Filtration breakthrough*), se figur 5. Default-inställningen för långsamfilter är att de alltid fungerar som de ska, dvs sannolikheten för filtergenombrott antas vara noll (0%).

Att det står siffror under *Scenario Analysis* och *Enter probability of SSF breakthrough* spelar i det här läget ingen roll. Verktyget kommer inte ta hänsyn till dessa i beräkningarna (för att dessa ska komma med i beräkningarna måste *Scenario* respektive *Enter probability of Slow Sand Filter breakthrough* väljas).



Figur 5. Scenarioanalys

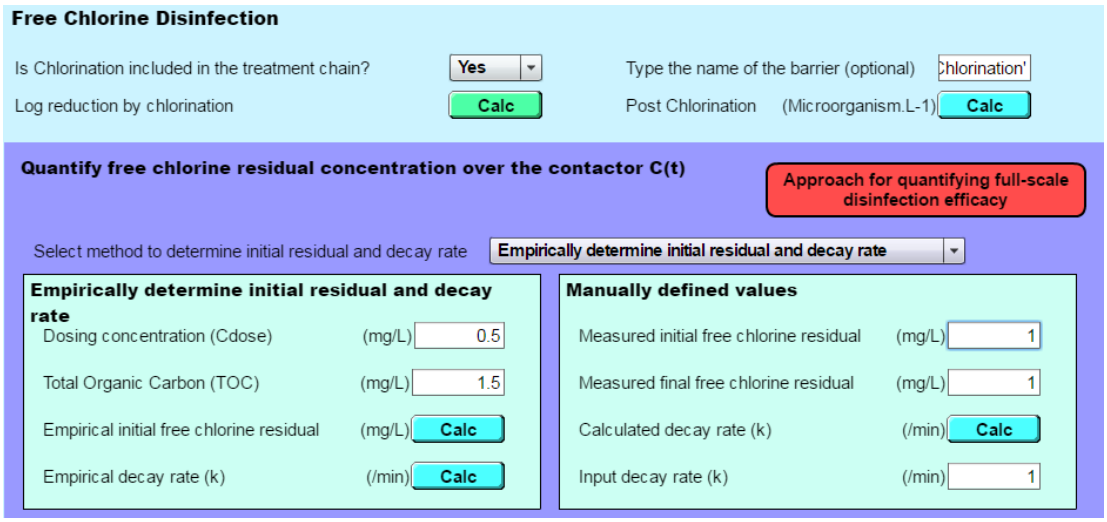
Desinfektion med natriumhypoklorit

Gå in på fliken *Free Chlorine Disinfektion*.

Vid Grönköpings vattenverk gäller följande indata avseende kloreringssteget:

Dos natriumhypoklorit	0,5 mg Cl_2/l
TOC-halt i utgående dricksvatten	1,5 mg/l
Dricksvattenproduktion, max	30 000 m^3/dygn 20,83 m^3/min
Reservoarvolym, max	2 000 m^3
Reservoarvolym, min	1 800 m^3
Hydraulisk faktor lågreservoar	0,6

Välj ”YES” på frågan om desinfektion med klor ska ingå i beredningsprocessen. Välj att bestämma initialhalt av fritt klor och nedbrytningshastighet empiriskt (*Empirically determine initial residual and dacay rate*) och mata in värden för klordos (0.5) och TOC-halt (1.5). Se figur 6.



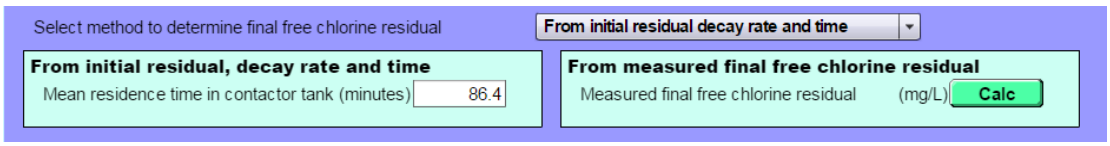
Figur 6. Desinfektion med klor

Välj att utgående halt fritt klor ska bestämmas utifrån nedbrytningshastighet och uppehållstid (*From initial residual, decay rate and time*), se figur 7.

Beräkna medeluppehållstiden i lågreservoaren enligt:

$$\frac{(Reservoarvolym, min)(m3)}{(Dricksvattenproduktion, \max)(\frac{m3}{min})} = \frac{(1800)(m3)}{(20{,}83)(\frac{m3}{min})} = 86{,}4\ min$$

Mata in detta värde (86.4) i rutan för *Mean residence time in contactor tank (minutes),* se figur 7.



Figur 7. Desinfektion med klor

Lågreservoarens utformning bestämmer hur väl vattnet omblandas och därigenom även vilken kontakttid som varje ”vattenpaket” har för reaktionen med kloret. För att bestämma desinfektionseffekten måste därför hänsyn tas till utformningen av lågreservoaren. I Grönköpings vattenverk är lågreservoaren rektangulär, d.v.s. den har ett högt längd/bredd-förhållande och den är försedd med ett flertal skärmväggar. Den hydrauliska faktorn t10/T är bedömd till 0,6.

I QMRA används inte hydraulisk faktor för att beskriva kontakttiden, istället beskrivs denna av det antal CSTR (Completely Stirred Tank Reactors, eller på svenska Antalet totalomblandade tankar) som lågreservoaren motsvarar, se tabell 2. Motsvarande tabell för bestämning av hydraulisk faktor finns i MBA- rapporten (Tabell 4.1), se tabell 3.

Tabell 2. Bestämning av antalet CSTR.

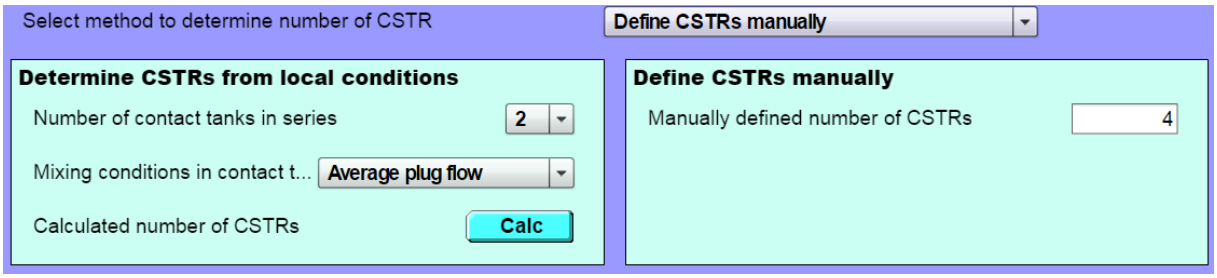
Blandningsförhållanden (pluggflöde PF i vardera kammaren)	Beskrivning av vardera kammaren i kontakttanken	Antal CSTR beroende på antalet kammare i serie		
		1	2	3
Inget PF	Inga skärmar, upprörd tank, höga in- och ut-hastigheter, lågt längd/bredd-förhållande i tanken (≤1)	1	2	3
Dåligt PF	Inga skärmar inuti tanken, enkla in- och utlopp i tanken, längd/bredd-förhållande i tanken >1	2	4	6
Medel PF	Skärmade in- och utlopp, vissa skärmar inuti tanken och eventuellt flera inlopp och utlopp, längd/bredd-förhållande i tanken > 4	3	6	9
Ganska bra PF	Skärmat inlopp, serpentin-skärmar inuti tanken för att öka längd/bredd-förhållande till > 6	5	10	15
Mycket bra PF	Skärmat inlopp, serpentin- eller perforerade plåtskärmar inuti tanken. Högt längd/bredd-förhållande (> 10)	7	14	21
Perfekt PF	Mycket högt längd/bredd-förhållande (> 20). Rörströmning.	10	20	30

Tabell 3. Tabell 4.1 från MBA-rapporten.

Grad av pluggflöde	Hydraulisk faktor, Fh		Beskrivning	Seriefaktor, Fs Antalet seriekopplade tankar		
	t_{10}/T	t_m/T				
	Anv. till Ct	Anv. till IF, k, C_i och C_{ut}		1 st	2 st	3 st
Ingen (Ideal blandning)	0,1	0,3	Inga ledväggar. Full omblandning Hög in och utloppshastighet Lågt längd/breddförhållande	1,0	2,0	2,5
Dålig	0,3	0,4	Inga ledväggar Ett eller flera in och utlopp	1,0	1,8	2,0
Medel	0,5	0,5	Skärmat inlopp eller utlopp Några väggar i tanken	1,0	1,5	1,8
Ganska bra	0,7	0,7	Skärmat in och utlopp Ledväggar i tanken Högt längd/breddförhållande	1,0	1,3	1,4
Mycket bra	0,9	0,9	Skärmat in och utlopp Ledväggar i tanken Mycket högt längd/breddförhållande	1,0	1,1	1,1
Perfekt	1,0	1,0	Rörströmning	1,0	1,0	1,0

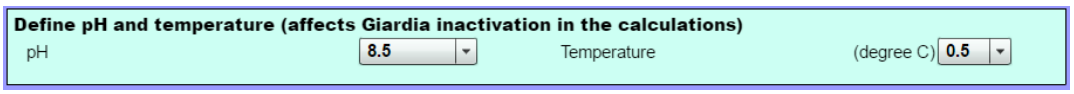
Som ses av tabell 3 motsvarar en hydraulisk faktor på 0,6 en grad av pluggflöde mellan *Medel* och *Ganska bra*. För att översätta detta till CSTR går vi in i tabell 2. Seriefaktorn är 1 i det här exemplet (lågreservoaren utgörs av en tank) och vi ser då i tabell 2 att antalet CSTR för *Medel* uppgår till 3 st och för *Ganska bra* till 5 st. Vi väljer värdet mellan dessa, d.v.s. 4 st CSTR.

Välj att definiera antalet CSTR manuellt (*Define CSTRs manually*) och mata in värdet 4, se figur 8.



Figur 8. Bestämning av CSTR

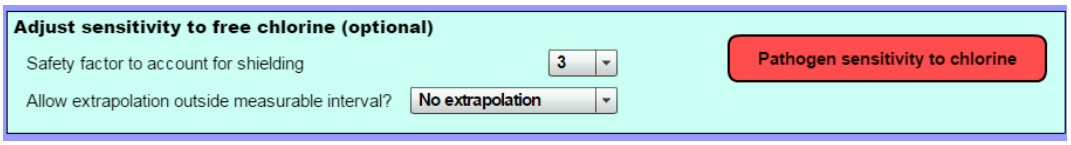
För Grönköpings vattenverk är dricksvattnets pH 8,2 och temperaturen kan periodvis vara nere i 0,5 °C. pH 8,2 finns inte med som val, utan vi måste välja mellan pH 8 eller 8,5. Eftersom desinfektionen fungerar sämre vid högre pH väljer vi pH 8,5 för att vara på den säkra sidan. Mata in pH 8,5 och temperatur 0,5 °C enligt figur 9.



Figur 9. Ange pH och temperatur

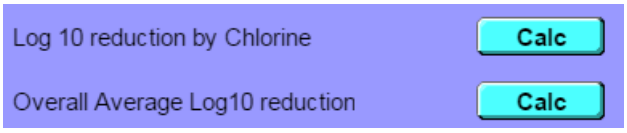
I QMRA finns möjlighet att justera bedömningen av olika patogeners känslighet mot klor. Detta kan göras genom att ange en säkerhetsfaktor som tar hänsyn till att patogenerna kan avskärmas från kloret p.g.a. exempelvis partiklar i vattnet, och genom att bestämma huruvida den desinficerande effekten ska beräknas genom extrapolering. Information kring vad dessa justeringar innebär finns att läsa på den informationssida i verktyget som nås genom att klicka på den röda knappen *Pathogen sensitivity to chlorine*, se figur 10.

Som grundinställning rekommenderas att säkerhetsfaktorn sätts till 3 och att extrapolering inte ska användas, se figur 10.



Figur 10. Säkerhetsfaktor och extrapolering

Slutligen kan logreduktionen som erhålls i kloreringssteget beräknas, genom att klicka på *Calc*.



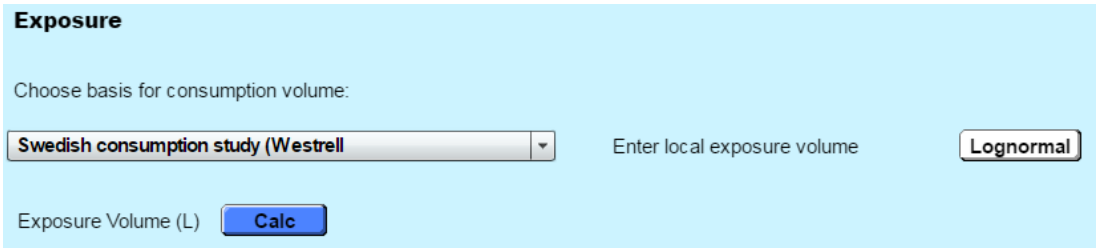
Figur 11. Beräkning av log10-reduktion

Log 10 reduction by Chlorine – Visar resultatet i form av sannolikhetsfördelningar.

Overall Average Log 10 reduction – Visar resultatet i form av medianvärde.

3.1.3 Exponering

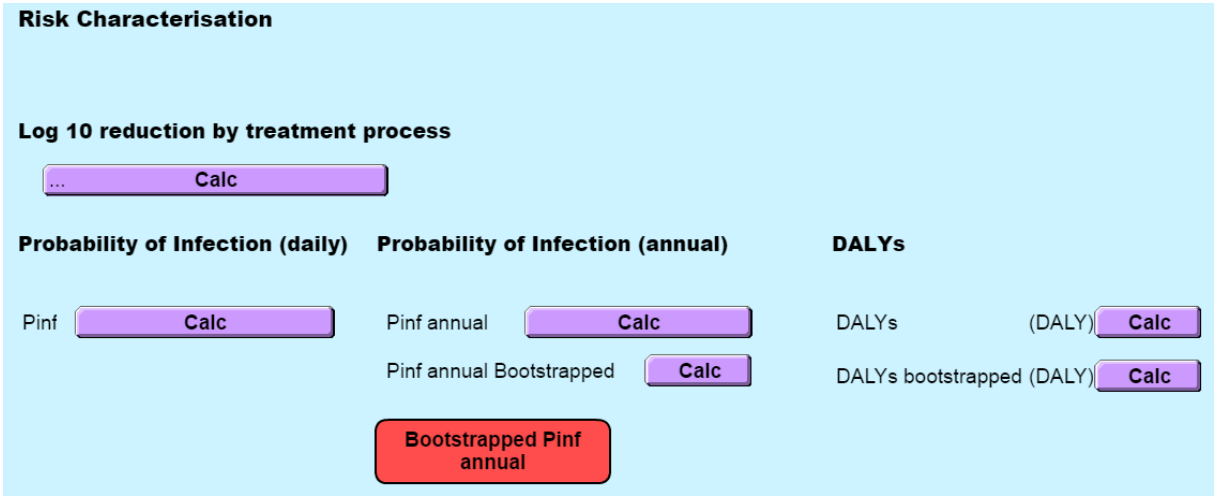
Med exponering menas hur mycket dricksvatten som konsumeras i en population, med hänsyn tagen till konsumtionsmönster och -volym. I verktyget finns förinställt konsumtionsmönster från en studie i Sverige. I detta exempel används förinställt konsumtionsmönster för Sverige, d.v.s. denna flik lämnas utan justering.



Figur 12. Ange drickvattenkonsumtionen

3.1.4 Riskkaraktärisering

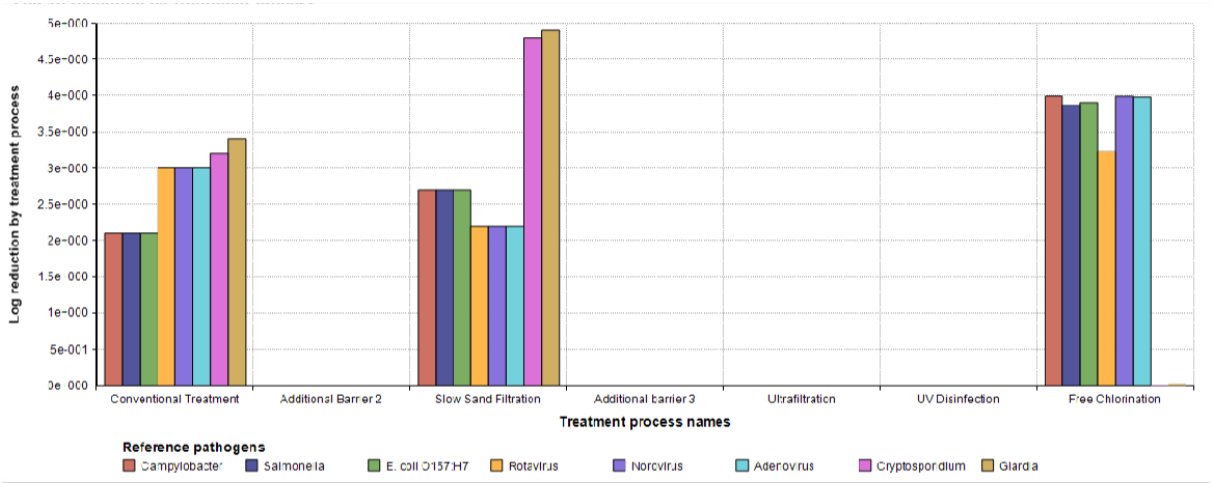
Nu har samtliga inmatningssteg gåtts igenom och det är dags att ta fram resultaten av analysen. Resultatet redovisas i verktyget som log-reduktion (avskiljning) för respektive beredningssteg, sannolikhet för infektion (daglig och årlig risk) samt som DALYs (Disability Adjusted Life Years). Klicka på *Calc* för att få fram respektive resultat. Se figur 13.



Figur 13. Beräkning av infektionsrisker

3.1.4.1 Log-avskiljning för respektive beredningssteg

Logavskiljningen presenteras för respektive patogen i de olika beredningsstegen. På x-axeln anges logavskiljningen på formen *(tal)e-000*. Med e-000 avses 10^{-0} vilket är detsamma som 1, vilket ger att exempelvis 2.0 e*^-000 utläses som 2,0 logs avskiljning. På samma sätt betyder exempelvis e-002 detsamma som 10^{-2} vilket är lika med 0,01.



	Additional Barrier 1	Conventional Treatment	Additional Barrier 2	Slow Sand Filtration	Additional barrier 3	Ultrafiltration	UV Disinfection	Free Chlorination	Ozone
Campylobacter	Not present	2.1e+000	Not present	2.7e+000	Not present	Not present	Not present	4e+000	Not present
Salmonella	Not present	2.1e+000	Not present	2.7e+000	Not present	Not present	Not present	3.9e+000	Not present
E. coli O157:H7	Not present	2.1e+000	Not present	2.7e+000	Not present	Not present	Not present	3.9e+000	Not present
Rotavirus	Not present	3e+000	Not present	2.2e+000	Not present	Not present	Not present	3.2e+000	Not present
Norovirus	Not present	3e+000	Not present	2.2e+000	Not present	Not present	Not present	4e+000	Not present
Adenovirus	Not present	3e+000	Not present	2.2e+000	Not present	Not present	Not present	4e+000	Not present
Cryptosporidium	Not present	3.2e+000	Not present	4.8e+000	Not present	Not present	Not present	0e+000	Not present
Giardia	Not present	3.4e+000	Not present	4.9e+000	Not present	Not present	Not present	2.3e-002	Not present

Figur 14. Log-avskiljning för respektive beredningssteg

3.1.4.2 Sannolikhet för infektion (årlig)

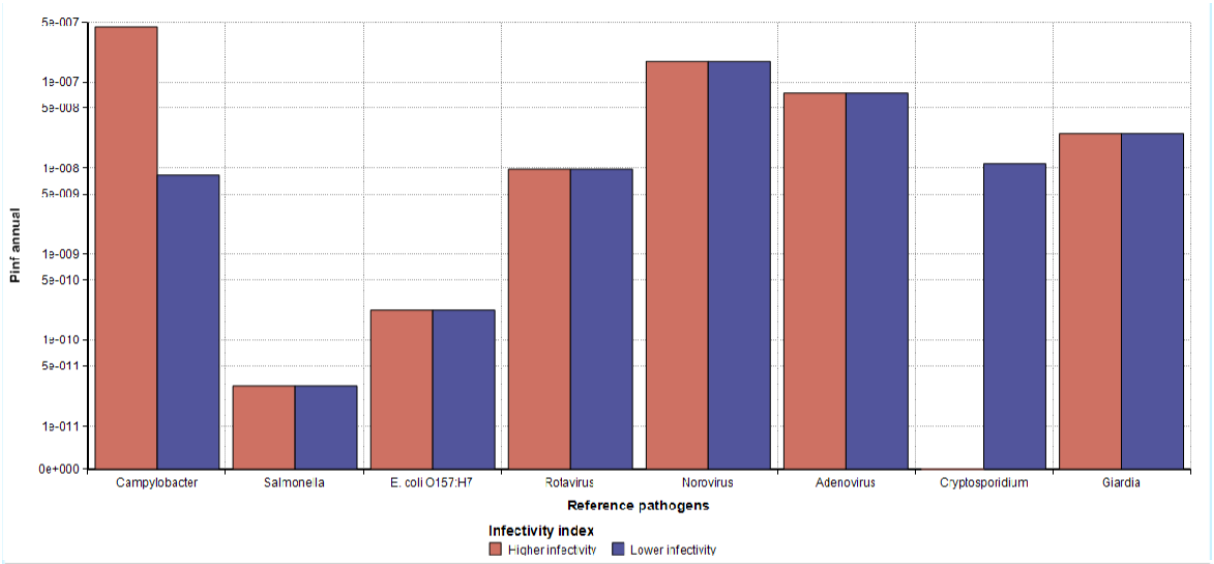
Sannolikheten för att konsumenter ska bli infekterade av det producerade dricksvattnet på årsbasis redovisas i form av Pinf (Probability of infection) annual.

Vad som är en acceptabel risk för vattenburen smitta är svårt att uppskatta och kvantifiera. I svensk lagstiftning finns ingen acceptabel risk definierad. Amerikanska naturvårdsverket (USEPA) har dock föreslagit en nivå på mindre än 1/10 000 infekterade personer per år som acceptabel risk. Denna nivå används också i Nederländerna och används ofta som utgångspunkt för diskussioner kring acceptabel risk även i Sverige.

Vi ser i figur 15 att ingen enskild patogen kommer upp i den acceptabla risknivån 1/10 000 ($1*10^{-4}$, 1e-004). Egentligen avser den acceptabla risken summan av alla patogener.

Resultaten i figuren redovisas både som High infectivity och som Low infectivity, med olika höjd på staplarna för Campylobacter och för Cryptosporidium. Detta beror på, att för dessa två patogener finns två olika dos-responsfunktioner som QMRA-verktyget räknar med. För Campylobacter genomfördes först en studie på människor som exponerades för tämligen höga doser, där resultatet beskrevs som en dos-responsfunktion (low infectivity). Senare gjordes en ny studie, där även två små utbrott fanns med i dataunderlaget, vilket pekade på en högre infektivitet för Campylobacter och därmed resulterade i en annan dos-responsfunktion (high infectivity). På samma sätt finns det för Cryptosporidium två olika dos-responsfunktioner, en som utgår från en studie på människor exponerade för Cryposporidium parvum (lower infectivity) och en senare studie som tog i beaktande skillnaden i variabilitet mellan olika isolat av Cryptosporidium (higher infectivity).

Skillnaden i staplarna för lower och higher infectivity i figuren ger en fingervisning om osäkerheten kopplad till valet av dos-responsfunktion.



	Campylobacter	Salmonella	E. coli O157:H7	Rotavirus	Norovirus	Adenovirus	Cryptosporidium	Giardia
Higher infectivity	4.4e-007	2.9e-011	2.2e-010	9.7e-009	1.7e-007	7.4e-008	0e+000	2.6e-008
Lower infectivity	8.3e-009	2.9e-011	2.2e-010	9.7e-009	1.7e-007	7.4e-008	1.1e-008	2.6e-008

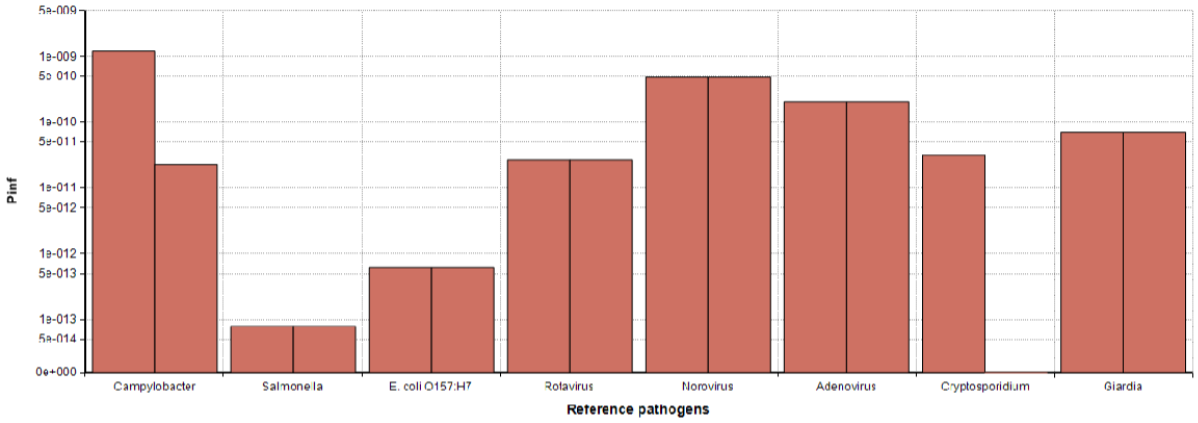
Figur 15. Sannolikhet för infektion (årlig)

3.1.4.3 Sannolikhet för infektion (daglig)

Sannolikheten för att konsumenter ska bli infekterade av det producerade dricksvattnet på daglig basis redovisas i form av Pinf (Probability of infection).

Räknar man om den årliga acceptabla risknivån 1/10 000 till acceptabel daglig risk blir denna ca $2,7*10^{-7}$ (1/10 000/365). Denna siffra kan sedan jämföras med de Pinf som beräknats för respektive patogen.

Vi ser i figur 16 att ingen enskild patogen kommer upp i den acceptabla dagliga risknivån $2,7*10^{-7}$. Egentligen avser den acceptabla risken summan av alla patogener.

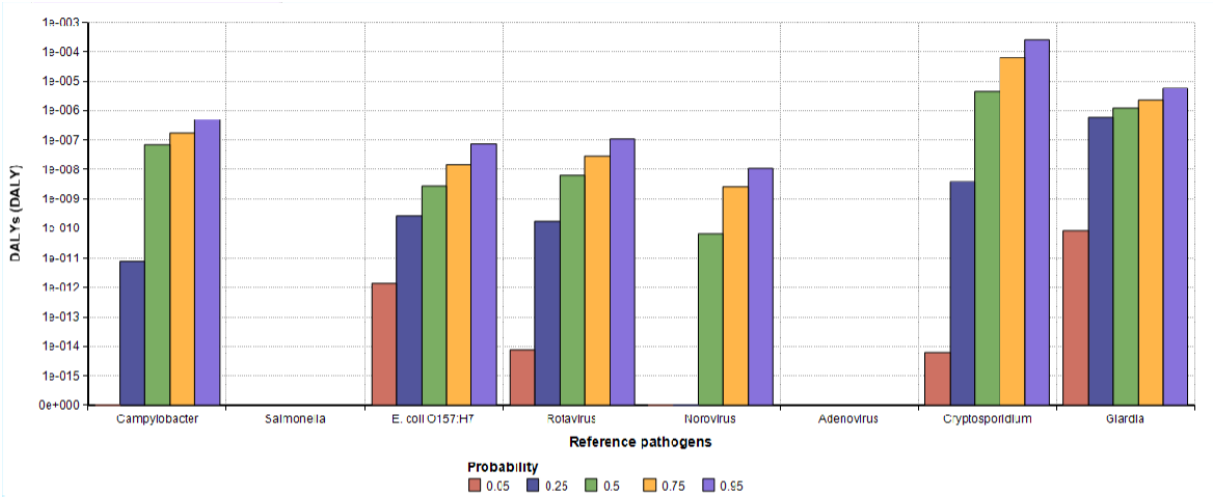


	Higher infectivity	Lower infectivity
Campylobacter	1.2e-009	2.3e-011
Salmonella	8e-014	8e-014
E. coli O157:H7	6.1e-013	6.1e-013
Rotavirus	2.6e-011	2.6e-011
Norovirus	4.8e-010	4.8e-010
Adenovirus	2e-010	2e-010
Cryptosporidium	0e+000	3.1e-011
Giardia	7e-011	7e-011

Figur 16. Sannolikhet för infektion (daglig)

3.1.4.4 Disability Adjusted Life Years (DALYs)

DALYs (Disability Adjusted Life Years) är ett sätt att uttrycka risk som tar hänsyn till hur allvarligt skada man lider och gör att i övrigt helt obesläktade risken kan jämföras (t.ex. risken för att bli infekterad av en vattenburen smitta kontra risker i trafiken). För DALYs har WHO satt den acceptabla risken för vattenrelaterad sjukdom till $1*10^{-6}$ DALY, d.v.s. 1 µDALY.



	Campylobacter	Salmonella	E. coli O157:H7	Rotavirus	Norovirus	Adenovirus	Cryptosporidium	Giardia
0.05	0e+000	no DALY calcs	1.373e-012	7.797e-015	0e+000	no DALY calcs	6.364e-015	8.141e-011
0.25	7.461e-012	no DALY calcs	2.609e-010	1.757e-010	0e+000	no DALY calcs	3.983e-009	6.084e-007
0.5	7.033e-008	no DALY calcs	2.707e-009	6.427e-009	6.591e-011	no DALY calcs	4.349e-006	1.204e-006
0.75	1.797e-007	no DALY calcs	1.518e-008	2.847e-008	2.582e-009	no DALY calcs	6.191e-005	2.314e-006
0.95	5.014e-007	no DALY calcs	7.481e-008	1.068e-007	1.063e-008	no DALY calcs	2.591e-004	5.894e-006

Figur 17. DALYs