

TU Delft
Faculty of Civil Engineering and Geosciences
Subfaculty Civil Engineering
Section Sanitary Engineering

CT4470 Drinking water I - Technology

Date : 14 January 2004
Time : 9.00-12.00 h

There are 7 questions of equal weight. In all questions it is important to show insight in the influence of process parameters on the treatment step in consideration, in order to be able to optimise design and operation.

The examination is based upon the Berenplaat treatment plant (Waterbedrijf Europoort)

During the examination a A4-tje with own notes may **NOT** be used.

If there are uncertainties about the question, do not hesitate to ask the supervisor.

Motivate your answer and check if the answer is complete and practical.

Overview of questions

1. Softening
2. Coagulation/flocculation
3. Sedimentation
4. Filtration
5. Adsorption
6. UV disinfection
7. Membrane filtration

General data

Table 1 – Atom mass of important elements in water chemistry.

Element	Atom mass	Element	Atom mass
H	1	S	32
C	12	Cl	35,5
N	14	K	39
O	16	Ca	40
F	19	Mn	55
Na	23	Fe	56
Mg	24	As	75
Al	27	Pb	207
P	31		

Table 2 - Dynamic and kinematic viscosity as function of temperature.

Temperature [°C]	Dynamic viscosity [10^{-3} Pa·s]	Kinematic viscosity [10^{-6} m ² /s]
0	1,79	1,79
5	1,52	1,52
10	1,31	1,31
15	1,15	1,15
20	1,01	1,01
25	0,90	0,90
30	0,80	0,80

Relevant formulas in water chemistry

bij T = 10°C

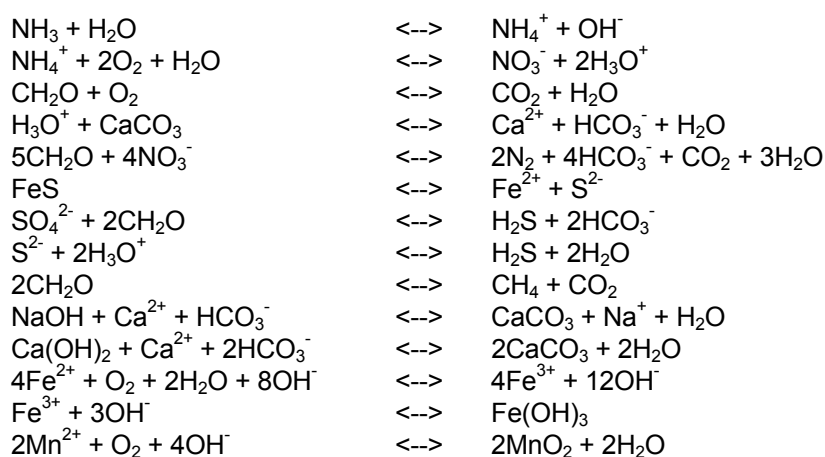
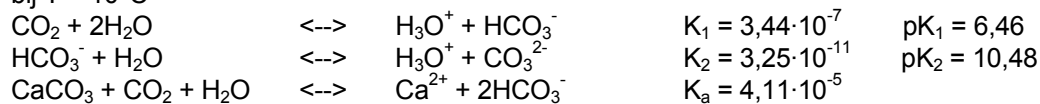


Table 3 - k_D -values for different gasses as function of temperature.

k_D	0°C	10°C	20°C
Nitrogen	0,023	0,019	0,016
Oxygen	0,049	0,039	0,033
Methane	0,055	0,043	0,034
Carbon dioxide	1,710	1,230	0,942
Hydrogen sulfide	4,690	3,650	2,870
Tetrachloroethene	-	3,380	1,880
Trichloroethene	-	4,100	2,390
Chloroform	-	9,620	5,070

Universal gas constant $R = 8,3142 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$

Table 4 – Composition of air in atmosphere ($T = 10^\circ\text{C}$, $p = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$)

Gas	Volume percentage [%]
Nitrogen	78,1
Oxygen	20,95
Carbon dioxide	0,003
Argon	0,93
Rest gasses	0,0002

Relevant formula

$$c = \frac{p}{R \cdot T} \cdot MW$$

$$RQ = \frac{Q_i}{Q_w}$$

$$K_1 = 1 - \exp(-k_2 \cdot t)$$

$$K_3 = \frac{1 - \exp\left(-k_2 \cdot t \cdot \left(1 + \frac{k_D}{RQ}\right)\right)}{1 + \frac{k_D}{RQ}}$$

$$K_5 = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_2 \cdot t} + \frac{k_D}{RQ}}$$

$$l_0 = \frac{H_0}{L} = 180 \cdot \frac{v}{g} \cdot \frac{(1 - p_0)^2}{p_0^3} \cdot \frac{v}{d^2}$$

$$H_{\max} = (1 - p) \cdot L \cdot \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w}$$

$$\frac{c_0}{c_e} = 1 + \exp\left(k_2 \cdot EBCT \cdot \left(1 - \frac{BV \cdot c_0}{q \cdot p}\right)\right)$$

$$J = \frac{Q}{A_{\text{mem}}} = \frac{K_w \cdot (TMD - \Delta\pi)}{v}$$

$$\pi = \sum \frac{R \cdot T \cdot c_i \cdot z_i}{MW_i}$$

$$Ret = 1 - \frac{c_p}{c_f}$$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

$$s_0 = \frac{Q}{B \cdot H}$$

$$Re = \frac{v_0 \cdot R}{v}$$

$$R = \frac{B \cdot H}{B + 2 \cdot H}$$

$$\frac{dc}{dt} = k_2 \cdot (c_s - c)$$

$$K = \frac{c_e - c_0}{c_s - c_0}$$

$$K_2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_2 \cdot t}}$$

$$K_4 = \frac{1 - \exp\left(-k_2 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{k_D}{RQ}\right)\right)}{1 - \frac{k_D}{RQ} \cdot \exp\left(-k_2 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{k_D}{RQ}\right)\right)}$$

$$K = 1 - (1 - k)^n$$

$$H = 130 \cdot \frac{v^{0.8}}{g} \cdot \frac{(1 - p_e)^{1.8}}{p_e^3} \cdot \frac{v^{1.2}}{d^{1.8}} \cdot L_e$$

$$q_{\max} = \frac{x}{m} = K \cdot c_s^n$$

$$BV = \frac{Q \cdot T}{V} = \frac{T}{EBCT}$$

$$TMD = \frac{P_f + P_c}{2} - P_p = P_f - \frac{\Delta P_{\text{hydr}}}{2} - P_p$$

$$\gamma = \frac{Q_p}{Q_f}$$

$$\beta = \exp\left(\frac{J \cdot \delta}{D_i}\right)$$

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta H$$

$$r = (1 - p_0) + \frac{1}{s_0} \cdot \int_0^{p_0} s dp$$

$$Fr = \frac{v_0^2}{g \cdot R}$$

$$\tau = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho_w \cdot v_s^2$$

Productielocatie Berenplaat

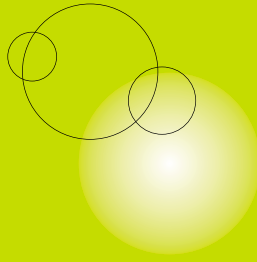
Feiten & Cijfers



Productielocatie Berenplaat van Waterbedrijf Europoort is de grootste drinkwaterzuivering van Nederland. Jaarlijks wordt hier 100 miljoen kubieke meter drinkwater bereid. Ook de architectuur van Berenplaat is uniek. De gebouwen zijn ontworpen door de bekende Nederlandse architect W. Quist.



**WATERBEDRIJF
EUROPOORT**



Regenwater als bron

De grondstof voor het drinkwater is water uit de regenrivier de Maas. In de spaarbekken van de NV Waterwinningbedrijf Brabantse Biesbosch ondergaat dit een natuurlijke voorzuivering van vijf maanden en wordt het in hardheid verlaagd tot 8,5 grad Duitse hardheid (DH).

Vanuit de Biesbosch wordt het water door een 30 km lange transportleiding met een diameter van 1.800 mm naar de Berenplaat rechtstreeks naar het lagedruk pompstation verpompt. Tevens wordt het Biesbosch water voor noodgevallen in het spaarbekken en het wateronttrekkingskanaal van de Berenplaat opgeslagen. Bij uitval van de ruwwatervoorziening van de Biesbosch kan het lagedruk pompstation het water uit het spaarbekken in het proces pompen. Een apart ruwwatertransportpompstation kan in dat geval ook de ruwwaterlevering aan Kralingen vanuit dit spaarbekken overnemen.

Inlaat Pompstation: 5 pompen, elk 12.500 m³/uur

Inhoud Spaarbekken: 7.300.000 m³

Inhoud Wateronttrekkingskanaal: 200.000 m³

Ruwwatertransportpompstation: 2 pompen, elk 5.000 m³/uur

Doseringsgebouw

De pompen van het lage druk pompstation pompen het water in het doseergebouw omhoog. Daar wordt het water eerst gezeefd in microzeven. Dit zijn grote draaiende trommels, waarover een fijnmazige zeef gespannen is. De microzeven verwijderen alle deeltjes in het ruwwater die groter zijn dan 35 µm.

Om het water te desinfecteren wordt chloorbleekloog aan het water toegevoegd. Dit moet een half uur op het water inwerken. Dit gebeurt in een kelder met een labyrint van kanalen. Tot slot wordt met mechanische roerders een aantal chemicaliën gedoseerd: ferrichloride (FeCl₃) en kalk om de pH-waarde van het water te corrigeren.

Indien nodig worden ook een vlokhelpmiddel en poederkool toegevoegd.

Lage Druk Pompstation: 2 pompstraten met elk 5 pompen (per pompstraat 18.500 m³/uur)

Microzeven: 16 zeven, maaswijdte 35 µm

Chloorbleekloogdosering: ca. 1 mg Cl₂ / liter

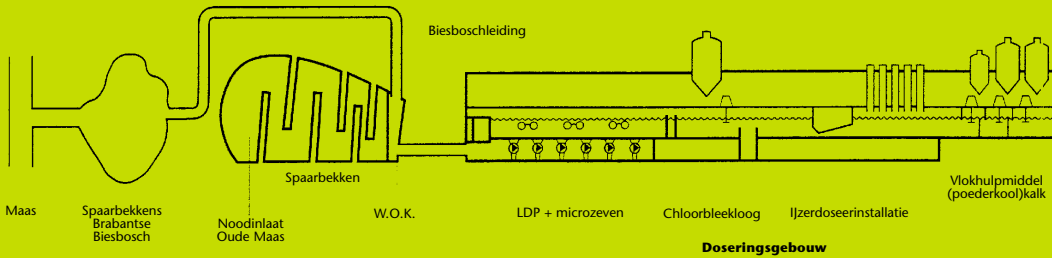
Ferrichloridedosering: ca.5 mg FeCl₃ / liter

Vlokhelpmiddeldosering ('s winters):

ca. 1 mg Wispro / liter

Poederkooldosering (indien nodig): ca. 7,5 mg / liter

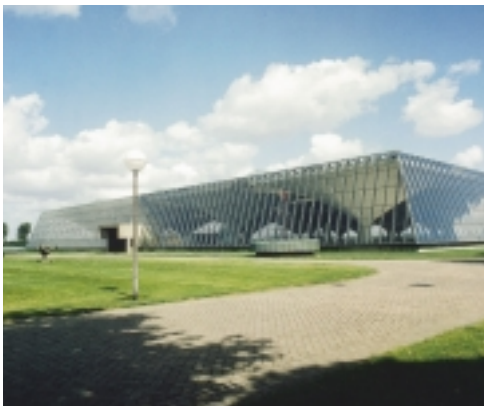
Kalkdosering: ca. 6 mg CaO / liter



Filtergebouw

De dosering van ferrichloride is bedoeld om de humuszuren en zwevende stoffen die nog in het ruwwater aanwezig zijn, aan te pakken. Het ferrichloride vormt kleine ijzervlokken rondom de vuile deeltjes. Langzame roeders zorgen ervoor dat de vlokjes aan elkaar klitten en zo groter worden. Een vlokulpmiddel kan dit proces zonodig versnellen. Doordat de vlokken zwaarder zijn dan water, kunnen zij vervolgens worden verwijderd. Dit proces vindt plaats in de vlokkendekenfilters. De vlokken worden daarna afgevoerd.

Voor het verwijderen van de resterende troebeling, de reuk- en smaakstoffen alsmede de microverontreinigingen wordt het water vervolgens over koolfilters geleid. Deze filters bestaan uit een laag korrelvormige actieve kool van 1,1 m hoogte, aangebracht op een steunlaag



van grind. Omdat deze filters langzaam vervuilen, moeten zij om de paar dagen met water in tegengestelde richting worden schoongespoeld. Ook gaat de kool langzaam in effectiviteit achteruit. De kool moet daarom regelmatig terug naar de fabriek voor regeneratie.

Cascadevormige beluchters brengen zuurstof in het water voordat het water naar de reinwaterreservoirs wordt getransporteerd. Om nagroei-bacteriën te elimineren en er zodoende voor te zorgen dat het water tijdens het transport haar goede kwaliteit behoudt, wordt in de bovenste overstort van de cascades chloorbleekloog gedoseerd.

Vlokkendekenfilters: 80 filters van 5,7 x 8,3 m

Oppervlaktebelasting: max. 4,8 m/uur

Actieve koolfilters: 24 filters van 4,2 x 19,1 m

Inhoud per filter: 84 m³

Koolspecificatie: Chemviron kool TL8611,

E.K. 0,8-1 mm

Regeneratiefrequentie: ca. 1¹/₄ jaar

Filtersnelheid: max. 9,4 m/h

Contacttijd: min. 7 min

Expansie tijdens het schoonspoelen: 16 - 20 %

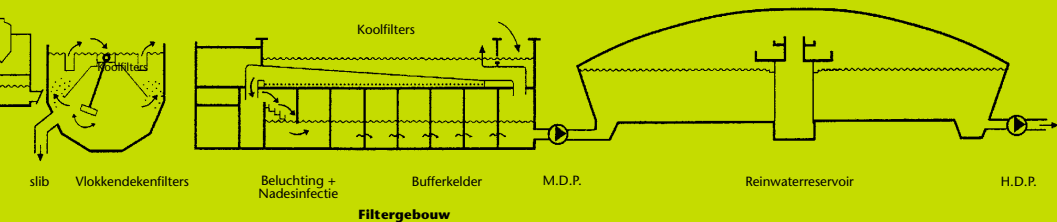
Cascadebeluchters: 4 beluchters met 5 treden

met een breedte van 35,7 m

Chloorbleekloogdosering: ca. 0,5 mg Cl₂ / liter

Bufferkelders: inhoud 2 x 2.500 m³

Midden Druk Pompstation: 2 pompstraten met elk 4 pompen (per pompstraat 15.000 m³/uur)



Reinwaterreservoirs en Hogedruk Pompstations

De hogedruk pompstations brengen het water vervolgens op een druk van maximaal 50 m +NAP, voldoende om het water overal in het distributiegebied te kunnen leveren. Overdag wordt veel meer water afgenomen dan 's nachts. Daarom zijn er tussen het midden druk pompstation en de hoge druk pompstations vier reinwaterreservoirs geplaatst (twee ronde uit 1962 en twee vierkante uit 1991 en 2002) die deze variatie opvangen.

Reinwaterreservoirs:

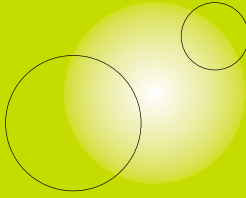
4 reservoirs van 35.000 m³ netto

Hoge Druk Pompstations: 3 pompstations;

1 pompstation van 8 pompdiesels,
totaal 26.500 m³/uur

2 elektrisch aangedreven pompstations elk met
5 pompen, totaal 22.500 m³/uur





Overige voorzieningen

Controle centrum

Vanuit het controle centrum in hoge druk pompstation 1 wordt het zuiveringsproces bewaakt. Dag en nacht zijn medewerkers aanwezig om het proces te controleren en waar nodig bij te sturen.

Noodstroominstallatie

Voor het zuiveringsproces is vanzelfsprekend energie vereist. In de eerste plaats voor de pompen, maar ook voor de warmtevoorziening en de procesregeling. Om bij stroomuitval toch nog water te kunnen leveren, beschikt Waterbedrijf Europoort over een noodstroominstallatie.

Chemicaliënopslag

Voor het zuiveringsproces worden diverse chemicaliën gebruikt:

- ferrichloride en Wispro-floc voor de vlokvorming,
- kalk om de pH van het water te verhogen tot het gewenste niveau
- chloorbleekloog voor de hoofd- en nadesinfectie.

De chemicaliën worden opgeslagen in silo's en tanks in en nabij het doseergebouw.

Huidige werkzaamheden

Thans wordt gewerkt aan een totale renovatie van de Berenplaat. Deze bestaat onder andere uit het vervangen van de gehele elektrische installatie, het introduceren van een proces automatiseringssysteem en het opsplitsen van de installatie in twee strikt gescheiden productiestraten. Voorts wordt de hoofddesinfectie van de zuivering vervangen door UV desinfectie en wordt een actief koolfiltratie stap aan het zuiveringsproces toegevoegd. De werkzaamheden zullen eind 2005 grotendeels gereed zijn.





Berenplaat is een van de drie productie-locaties van Waterbedrijf Europoort. Berenplaat levert drinkwater aan Rotterdam-Zuid, West-IJsselmonde, het westelijk haven- en industriegebied, Voorne-Putten en het westelijk deel van de Hoeksche Waard.

De inwoners van Rotterdam-West, Schiedam, Vlaardingen, Maassluis en een deel van het Westland drinken eveneens water van de Berenplaat.

Met een leiding gelegd over de Haringvliet-dam is het mogelijk steunleveringen aan het eiland Goeree Overflakkee te verzorgen.

De grenzen van het leveringsgebied kunnen variëren als gevolg van onderhoud aan zuiveringsinstallaties en/of het transport-leidingnet.

Berenplaat in 't kort

In bedrijf gesteld: 1966

Grondoppervlak: 163 ha

Productiecapaciteit: 18.000 m³/uur

Levering per jaar: 100 miljoen m³

Investing (1966): ca. € 70 miljoen

(ca. f 150 miljoen)

Investing huidige renovatie (1996 - 2006):

ca. € 180 miljoen (ca. f 400 miljoen)

Personeel: 50 medewerkers



Productielocatie Berenplaat

Berenplaat 10, 3209 LJ Spijkenisse

Tel. (010) 293 60 00

www.waterbedrijfeuropoort.nl

1. Softening

The softening of water for the "Berenplaat" is performed by dosing Ca(OH)_2 to the storage ponds of the "Brabantse Biesbosch". The water quality of the river Meuse is (the river Meuse is the feed of the storage lakes):

Ca^{2+}	53 mg/l
Mg^{2+}	17,5 mg/l
Na^+	37 mg/l
HCO_3^-	154 mg/l
PH	7,9
Temperature	10°C

- 1.1 Calculate the hardness of the raw water in mmol/l
- 1.2 Calculate the amount of Ca(OH)_2 needed to lower the hardness to the regulated value of 1,5 mmol/l
- 1.3 What are the benefits and the drawbacks of using Ca(OH)_2 for softening compared to the use of NaOH? Are there, based on the water quality reasons to use no Ca(OH)_2 for softening? Explain your answer.
- 1.4 What are the pros and contras with softening in the storage lakes compared to softening in pellet softeners?

2. Coagulation/flocculation

- 2.1 Give the three mechanism of coagulation. What are the characteristics of each mechanism?
- 2.2 Give three methods to enhance the coagulation at lower temperatures.
- 2.3 The optimal G-value in the flocculation part of the sludge blanket clarifier is 20 s^{-1} . At 20 °C is the needed energy of the stirring device of 40 W. How many energy is needed at 5 °C in order to get the same G-value?
- 2.4 Calculate the residence time of the water in the flocculation part (about 2/3 of the total volume) of the sludge blanket clarifier at an average water production. The height of the sludge blanket clarifier is 3 meters.
- 2.5 What are the differences in flocculation parameters in the sludge blanket clarifier compared to an installation with a separate flocculation rooms. Explain your answer.

3. Sedimentation

- 3.1 Calculate the surface load in m/hr in the sedimentation part of the sludge blanket clarifier at the level of the discharge gutters at an average water production. Disregard the gutters in your calculation.
- 3.2 Discus the pros and contras of a sludge blanket clarifier compared to a lamellae separator.
- 3.3 Calculate the hydraulic conditions in the upward water flow just underneath the discharge gutters at a temperature of 20°C. Are the conditions turbulent or is are there short circuit streams?

4. Rapid filtration

- 4.1 In the new treatment of the Berenplaat the adsorption is performed in separate granular activated carbon filters. The filters now filled with activated carbon are filled with granular material. Double layer filtration is planned. What are the benefits of double layer filtration?
- 4.2 Are you going to advice an upflow or a downflow filter? Explain your answer and point out which layer contains the coarse/fine grains and which layer contains the grains with a high/low density.
- 4.3 Calculate the clean bed resistance at an average water production of a filter with 0.5 meter grains of 4 mm and 0.5 meter grains of 1,5 mm. (temperature = 20 °C en spherical grains, porosity=40%).

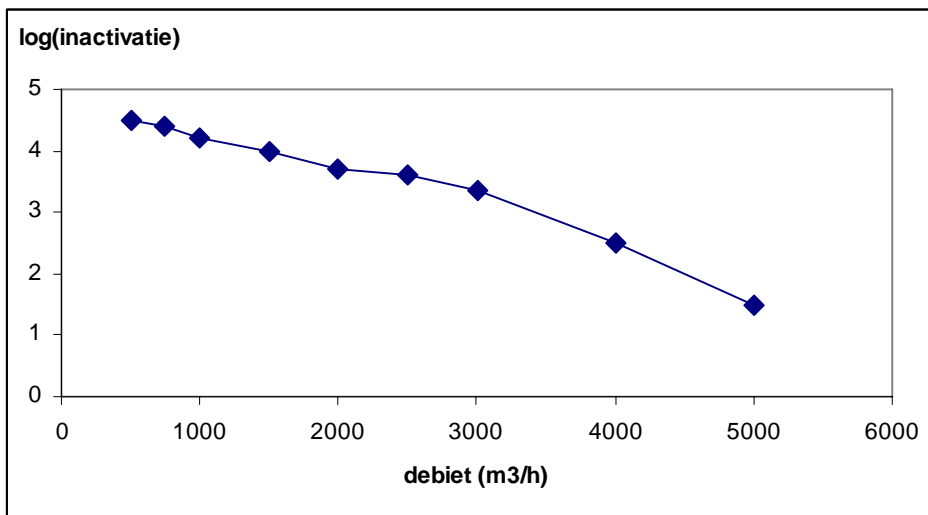
5. Granular activated carbon filtration

- 5.1 Which water quality parameters are improved by activated carbon?
- 5.2 Determine the load of atrazin in the activated carbon filters based on the service time of the filters (from start until regeneration). The average atrazin concentration in the feed is 0,3 ug/l (density carbon = 700 kg/m³)
- 5.3 Calculate the empty bed contact time (EBCT) at an average water production and the amount of bed volumes just before regeneration.
- 5.4 After the renovation of the production plant the activated carbon filtration will be placed as a separate step behind the UV-desinfection. The filters now used for activated carbon filtration will be operated as double layer filters for the removal of suspended solids. The new process design is beneficial for both the process of suspended matter removal as well as the adsorption process. Mention two advantages for the filtration process and two advantages for the adsorption process.
- 5.5 What is the main reason for planning the adsorption process behind the UV-desinfection and not in the reverse order?

6. UV-desinfection

The inactivation of micro organisms during UV-desinfection is given in logunits. 3 logunits inactivation is equal to 99.9% inactivation. The inactivation is depending on the contact time and the UV-dose.

- 6.1 Calculate from the graph below the concentration living bacteria after UV-desinfection with a flow of 3000 m³/h and an influent concentration of 10000 bacteria per ml.



Desinfection of an UV-lamp as a function of the flow

- 6.2 The production of "Berenplaat" is divided in two independent streets. During an accident one of the two streets is out of order for a longer time. The company want to distribute at least 80% of the average production. The 80% is now produced in one street in stead of two. Every process is able to produce 30% more water. For the UV-desinfection there are two options:

- A 30% increase in flow in the UV-reactors
- A bypass around the UV-desinfection of 30%

Calculate in both cases the absolute amount of bacteria in the finished water and the logremoval. The UV-dose is not changed and the average flow in the UV-reactors is 3000 m³/h. Which option is better?

7. Membrane filtration

In an industrial water project of WBE water is produced to make steam. A low concentration of ions is needed for this water.

7.1 Make your choice for a membrane filtration (NF; MF; RO or UF) and explain your answer? Write down which parameters are removed by each type and which parameters are not removed.

7.2 Calculate the recovery at a concentrate production of 50 m³/hr and a total permeate production of 214 m³/hr

7.3 The installation consists of 24 pressure vessels in the first stage and 12 pressure vessels in the second stage. Each pressure vessel contains six membrane elements.

There is an optimisation going on in order to increase the recovery to 84%. The recovery can be increased in several ways:

a) by decreasing the concentrate flow. The permeate production is not changed. Calculate the new concentrate flow

b) by increasing the feed pressure and therefore producing more permeate. The concentrate flow is not changed. Calculate the new permeate flow.

c) by adding a third stage with six pressure vessels with one element each (every element has about 15% recovery). Calculate the new concentrate and permeate flow of the plant. (assume that the flows in the first and the second stages are unchanged).

7.4 What are the main advantages and drawbacks of each of the three approaches? Take into consideration scaling and costs.

Answers
CT4470 Drinking water-I
14 January 2004

1.1 The hardness is $53/40 + 17.5/24.3 = 2.04$ mmol/l
 1.2 $\text{pH} = \text{p}K_1 - \log([\text{CO}_2]/[\text{HCO}_3^-]) \rightarrow 7.9 = 6.46 - \log([\text{CO}_2]/[2.52]) \rightarrow \text{CO}_2 = 0.1$ mmol/l
 At dosing of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ firstly CO_2 is removed
 $\text{CO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \cdot \text{HCO}_3^-$

0.1		1.33	2.52
-0.1	-0.05	+0.05	+0.1
+			
0		1.38	2.62

Afterwards the softening reaction takes place till a calcium hardness of 0.78 mmol/l
 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Ca}^{2+} + 2 \cdot \text{HCO}_3^- \rightarrow 2 \cdot \text{CaCO}_3 + 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

	1.38	2.62	
-0.6	-0.6	-1.2	
+			
	0.78	1.42	

In total $0.05 + 0.6 = 0.65$ mmol $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is dosed.
 Occasionally the removal of CO_2 can be neglected with the reason that at this pH almost no CO_2 is present.

- 1.3 Advantages $\text{Ca}(\text{OH})_2$: costs, no increase in Na^+ .
 Disadvantages $\text{Ca}(\text{OH})_2$: buffering capacity is strongly reduced (HCO_3^- is lower than when NaOH is used)
- 1.4 Advantages: low investment costs
 Disadvantages: short circuiting, sludge production difficult to remove, no flexibility in location of softening in the treatment.

- 2.1 Sweep/precipitation coagulation; adsorptive coagulation en electrostatic coagulation.
 2.2 Coagulant aid; increase of mixing speed; increase of ironchloride dosing.
 2.3 $G_v = (P/(V \cdot \mu))^{0.5}$; μ ($t=20^\circ\text{C}$)= 1×10^{-3} ; μ ($t=5^\circ\text{C}$)= 1.52×10^{-3} ; V and G_v do not change; Thus $P=40 \cdot 1.52 = 60.8$ W
 2.4 $5.7 \cdot 8.3^2/3 = 95$ m³; $Q_{av} = 11416$ m³/h; thus retention time = $95 \cdot 80 / 11416 \cdot 60 = 40$ minutes
 2.5 The G-values are low and the retention time is long. In addition, the G-value increases during the retention time while it decreases in a separate floc formation device. The C_v is higher in a sludge blanket reactor.

- 3.1 $A = 8.3 \cdot 5.7 \cdot 80 = 3785$ m²; $S = Q/A = 11416/3785 = 3$ m/h
 3.2 Titled plate settler: compact, low surface loading, hydraulic conditions are superior. Thus settling is much better; sludge blanket: two-in-one' : costs! Short retention time, flocs are filtered in the blanket.
 3.3 $R = 5.7 \cdot 8.3 / (5.7 + 2 \cdot 8.3) = 1.69$
 $C_p = v^2/gR = 4.2 \cdot 10^{-8}$
 $Re = vR/\nu = 1408$
 Laminar flow and short circuiting

- 4.1 More capacity for solid accumulation; longer filter run times; better effluent quality.
 4.2 Down flow filter: actual filter are down flow filters. Most of the clogging occurs in the top layer and is easily removed by back-washing. The top layer is of coarse material with low density. After back-washing the grains must settle on top. The bottom layer is of fine sand with high density.

- 4.3 First layer: $H=L=180 \times 0.000001/10 \times (1-0.4)^2/0.4^3 \times 5.9/60/60/0.004^2 \times 0.5=0.0052$ m
 Second layer: $H=L=180 \times 0.000001/10 \times (1-0.4)^2/0.4^3 \times 5.9/60/60/0.0015^2 \times 0.5=0.037$ m
 Total H= 0.042 m
- 5.1 Odour and taste; colour; pesticides and prevention of disinfection by-product formation by lowering the organic matter content.
- 5.2 Total volume of the GAC-filters= $24 \times 84=2016$ m³
 Total amount of atrazin during 1,25 year of run time= $1,25 \times 100.000.000 \text{m}^3 \times 0.3 \text{mg/m}^3=37500$ g.
 The loading is $37500/2016= 18.6$ g/m³ carbon. At a density of 700 kg/m³ this is 0.027 g/kg
- 5.3 $v=Q/A=11416/24/4.2/19.1=5.9$ m/h; $H=84/4.2/19.1=1.05$ m; $EBCT=H/v=1.05/5.9=0.18$ hour= 11 minutes; $BV=T/EBCT=1.25 \times 365 \times 24/0.18= 60833$ bed volumes
- 5.4 rapid filtration: higher backwash rates can be applied, which is positive for the efficiency. In addition a double layer filter has a higher capacity of solids accumulation. Activated-carbon filtration: the particle concentration is lower and thus the clogging hardly occurs and less back washing is needed. The concentration profile in the filter is not disturbed due to back washing and clogging could also result in short circuiting.
- 5.5 Adsorption of by-products formed during UV-desinfection.
- 6.1 At a flow of 3000 m³/h the log inactivation is about 3.3 . Thus only $10000/1995=5$ bacteria per ml remain in the water.
- 6.2 At a 30% higher flow the log inactivation reduces to 2.5 . $10000/316=31$ bacteria per ml remain in the water. With a by-pass of 30% the main stream has a 3.3 log inactivation (and thus 5 bacteria per ml). In the by-pass no disinfection occurs and thus 10000 bacteria per ml are present. The mixed effluent thus contains: $(5 \times 100 + 10000 \times 30)/130=2311$ bacteria per ml. This results in 0.6 log units inactivation. The by-pass alternative is mainly times worse!
- 7.1 To remove alle ions Reverse Osmosis is necessary. Nanofiltration removes bi- and tri-valent ions and only part of the mono-valent ions. Ultrafiltration removes viruses and other pathogenic micro-organisms and particles, but no ions. Microfiltration removes particles and micro-organisms except from viruses.
- 7.2 Recovery= $\text{permeate}/\text{feed}= 214/(214+50)=0,81$ (81%)
- 7.3 a $Q_c=40.8$ m³/h; b $Q_p=262.5$ m³/h; c feed third stage=concentrate second stage
 $Q_c=50 \times 0.85=42.5$ m³/h $Q_p=50 \times 0.15=7.5$. The concentrate of the third stage is also the concentrate of the total installation. The permeate of the third stage is added to the permeate of the other stages. Thus $Q_p=214+7.5=221.5$ m³/h.
- 7.4 In the first option cross-flow velocity is reduced and concentration polarisation is higher and there is risk of scaling. In the second option the flux of the total installation is higher. This can increase concentration polarisation and increase the risk of scaling. However, the increase in flux is highest in the first stage where the ion concentration is still low. High pressures ask fore more energy and increase the operational costs. In the third option the investment costs increase, but the circumstances in the membrane elements (flux and cross-flow velocities) remain optimal.