

12.0 Het verbrandingsdiagram van Prof. A.J. Terlinde

Geen verlies

In dit hoofdstuk zullen we wat nader ingaan op het straling- en convectiegedrag van een met afval gestookte ketel. We gaan in ons voorbeeld uit van onderstaande gegevens.

Voor de eenvoud nemen we aan dat er geen verliezen optreden. Met andere woorden alle toegevoerde energie aan de oven wordt gebruikt voor stralingswarmte en convectiewarmte.

Hieruit volgt dan ook de vuurhaard vergelijking.

Deze luidt:

$$Q_{toe} = Q_{straling} + Q_{convectie}$$

Voor de toegevoerde energie aan de oven kunnen we schrijven:

$$Q_{toe} = y \cdot \dot{m}_b \cdot H_0 + y \cdot \dot{m}_b \cdot c_b \cdot t_b + y \cdot \dot{m}_b \cdot \lambda \cdot M_{lth} \cdot c_l \cdot t_l$$

Voor de stralingswarmte kunnen we schrijven:

$$Q_{straling} = \frac{c_{straling} \cdot BO}{y} \cdot \left\{ \left(\frac{T_v}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 \right\}$$

Voor de convectiewarmte kunnen we schrijven:

$$Q_{convectie} = y \cdot \dot{m}_b \cdot (1 + \lambda \cdot M_{lth}) \cdot c_{rookgas} \cdot t_v$$

Verklaring van de gebruikte symbolen:

- y = De belastingsfactor van de ketel, 1 = 100%
- \dot{m}_b = De hoeveelheid verstoekt afval in kg/s bij vollast
- H_0 = De stookwaarde van het afval in kJ/kg
- c_b = De soortelijke warmte van het afval in kJ/kg.K
- t_b = De temperatuur van het afval in °C
- λ = De gebruikte luchtfactor
- M_{lth} = De theoretisch benodigde hoeveelheid verbrandingslucht.
- c_l = De soortelijke warmte van de lucht in kJ/kg.K
- t_l = De temperatuur van de lucht in °C
- $c_{straling}$ = De stralingsconstante in kW/m²K⁴
- BO = Het bestraald oppervlak van de ketel in m²
- T_v = De vuurhaard temperatuur in Kelvin
- T_p = De pijpwandtemperatuur van het verdamperopp. in K.
- $c_{rookgas}$ = De soortelijke warmte van de rookgasen in kJ/kg.K
- t_v = De vuurhaard temperatuur in °C

NB.

De vuurhaard temperatuur is per definitie de temperatuur van de rookgassen bij intrede convectie gedeelte. Bij deze ketel is dit dus de rookgas temperatuur bij intrede vierde trek.

In de formules gaan we uit van de volgende gegevens bij vollast:

y	=	1	= 100%
\dot{m}_b	=	6,667	kg/s bij vollast
H_0	=	10714	kJ/kg
c_b	=	4,5	kJ/kgK
t_b	=	15	°C
λ	=	1,474	
M_{lth}	=	4	kg/kg afval
c_l	=	1,05	kJ/kgK
t_l	=	80	°C
$c_{straling}$	=	0,00427	kW/m ² K ⁴
BO	=	1450	m ²
T_v	=	Variabel	Kelvin
T_p	=	550	Kelvin
$c_{rookgas}$	=	$1,1 + (2 * 10^{-4} * t_v) - 7 * 10^{-8} * t_v$	kJ/kgK, dit is een variabele waarde als functie van de vuurhaard temperatuur.
t_v	=	Variabel	°C

Voor de stookwaarde is een gemiddelde waarde genomen, het bestraald oppervlak is teruggerekend naar een praktijksituatie, hier waren geen gegevens van.

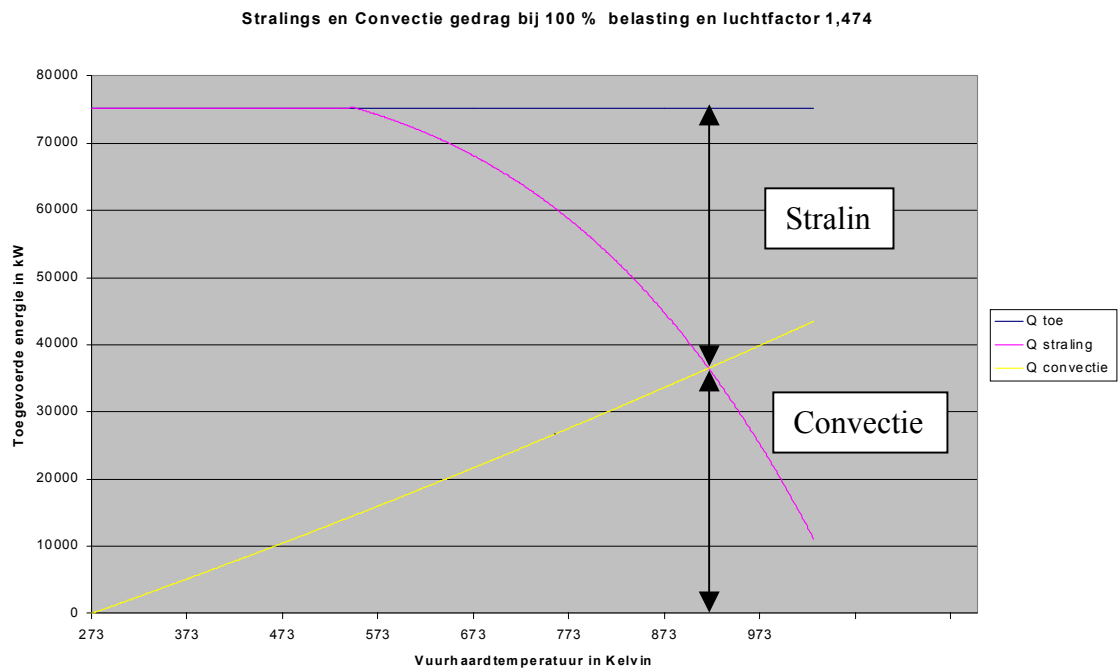
Als we deze waarden invullen levert dit ongeveer op:

$$Q_{toe} = 75.000 \text{ kW}$$

$Q_{straling}$:
Deze wordt gevonden door verschillende vuurhaardtemperaturen in te vullen en de vaste pijp wandtemperatuur 550 Kelvin

$Q_{convectie}$:
Deze wordt gevonden door de verschillende vuurhaard temperaturen in °C in te vullen.

In de grafiek wordt nu de toegevoerde energie op de verticale as uitgezet, de Stralingswarmte wordt van boven naar onder uitgezet en de Convectie warmte van onder naar boven.
Dit levert dan de volgende grafiek op.



Uit bovenstaande grafiek volgt dus welk aandeel van de toegevoerde energie voor straling en convectorie wordt gebruikt. Het snijpunt van de beide lijnen geeft de vuurhaardtemperatuur aan in Kelvin, ofwel 918 Kelvin, of 645 °C. Uit de grafiek volgt ook dat de hoeveelheid stralingswarmte ongeveer 38.000 kW en de hoeveelheid convectorie warmte ongeveer 37.000 kW bedraagt.

12.1 Verandering van de belasting met constante luchtfactor

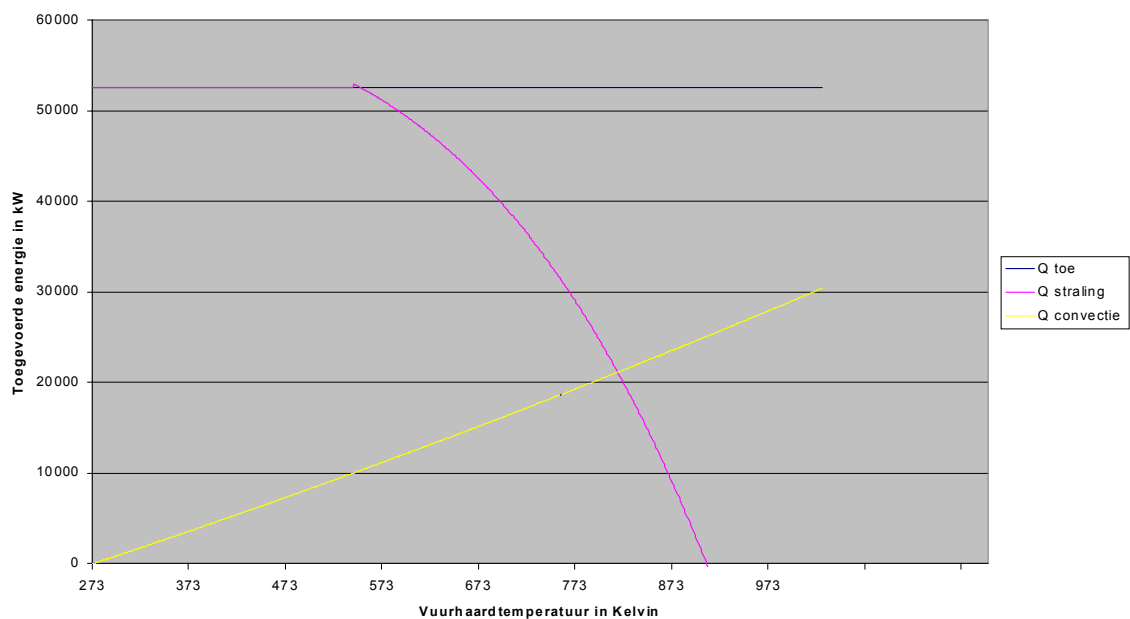
Stel dat we nu minder afval gaan verstoken, bijvoorbeeld 70 % van de maximum belasting, de waarde y wordt nu dus 0,7.

We nemen aan dat de toegepaste luchtfactor ongewijzigd blijft.

Let op, de luchtfactor blijft ongewijzigd, maar dit wil niet zeggen dat de hoeveelheid lucht in kg/s hetzelfde blijft!

Dit levert het onderstaande diagram op.

Stralings en Convectie gedrag bij 70 % belasting en luchtfactor 1,474



De nu ontstane grafiek leert ons dat het aandeel aan straling meer en het aandeel aan convectie warmte minder is geworden.

De vuurhaardtemperatuur is gedaald tot circa 816 Kelvin, ofwel 543 °C. Intrede vierde trek.

De hoeveelheid stralingswarmte bedraagt volgens de grafiek ongeveer 30.000 kW terwijl de hoeveelheid convectie warmte nog slechts 22.000 kW bedraagt.

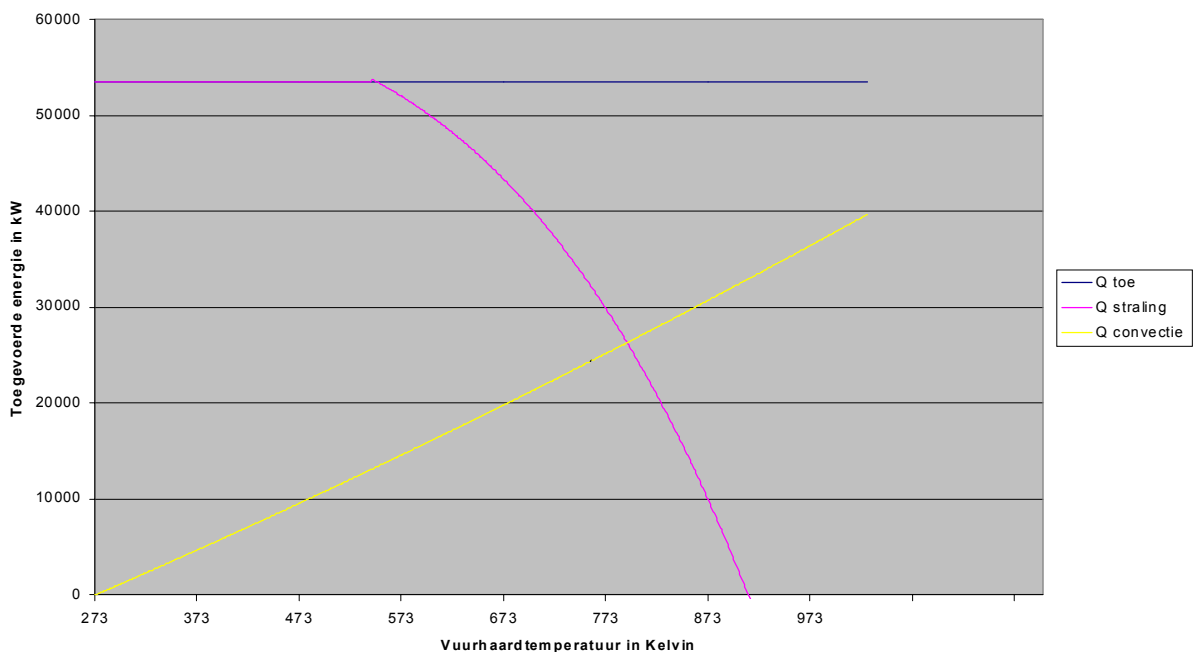
De totale hoeveelheid toegevoerde energie is hier gedaald tot circa 59000 kW.

Conclusie: Er is nu minder warmte beschikbaar om de stoom te oververhitten. Zonder ingrijpen zal de stoom temperatuur dalen.

12.2 Vergroting van de luchtfactor bij 70 % belasting

Als we nu de hoeveelheid convectie warmte willen vergroten, dan kunnen we dit doen door de luchtfactor te vergroten. Dit kan geschieden door bijvoorbeeld de hoeveelheid secundaire lucht te vergroten. Stel de luchtfactor wordt nu vergroot van 1,474 naar 2. Dit levert het onderstaande diagram op.

Stralings en Convectie gedrag bij 70 % belasting en luchtfactor 2



Dit diagram leert ons dat de hoeveelheid stralingswarmte nu ongeveer 27.000 kW bedraagt, terwijl de hoeveelheid convectiewarmte toegenomen is tot circa 26.000 kW.

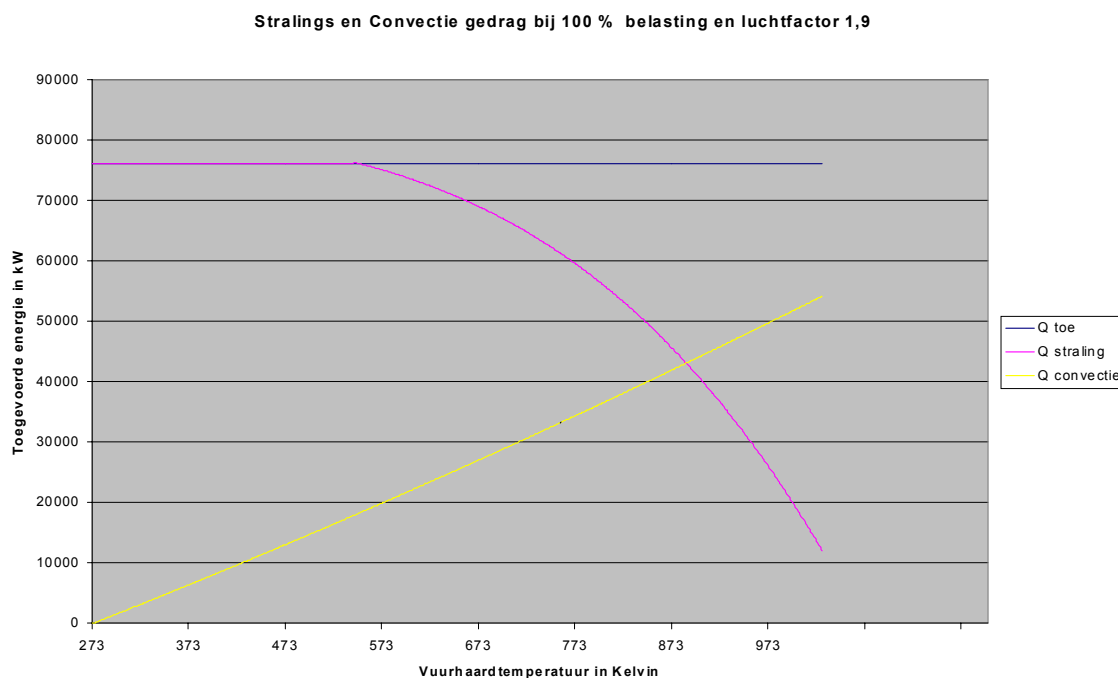
De vuurhaard temperatuur, dus de temperatuur van de rookgassen bij intrede vierde trek is niet noemenswaardig gedaald. De rookgas temperatuur bij intrede vierde trek bedraagt nu circa 793 Kelvin, ofwel 520 °C.

Merk overigens op dat de hoeveelheid toegevoerde energie aan de oven nagenoeg hetzelfde is gebleven als in voorgaand voorbeeld. Conclusie: Door verhoging van de luchtfactor, bij gelijkblijvende belasting, is er weer meer warmte beschikbaar om de stoomtemperatuur op de gewenste waarde te houden.

12.3 Verhoging van de luchtfactor bij volle belasting

Stel we hebben nu de volgende situatie. De belasting van de ketel is weer 100 %, ofwel $y = 1$, en we verhogen de luchtfactor nu van 1,474 naar bijvoorbeeld 1,9.

Dit levert het onderstaande diagram op.



Deze grafiek leert ons dat de hoeveelheid toegevoerde energie ongeveer 76.000 kW bedraagt, dus ongeveer hetzelfde als in het eerste voorbeeld. De hoeveelheid convectie warmte is echter toegenomen van 37.000 naar circa 43.000 kW.

De vuurhaard temperatuur bedraagt hier circa 888 Kelvin, ofwel 615 °C.

13.0 Demineralisatie

13.1 Inleiding

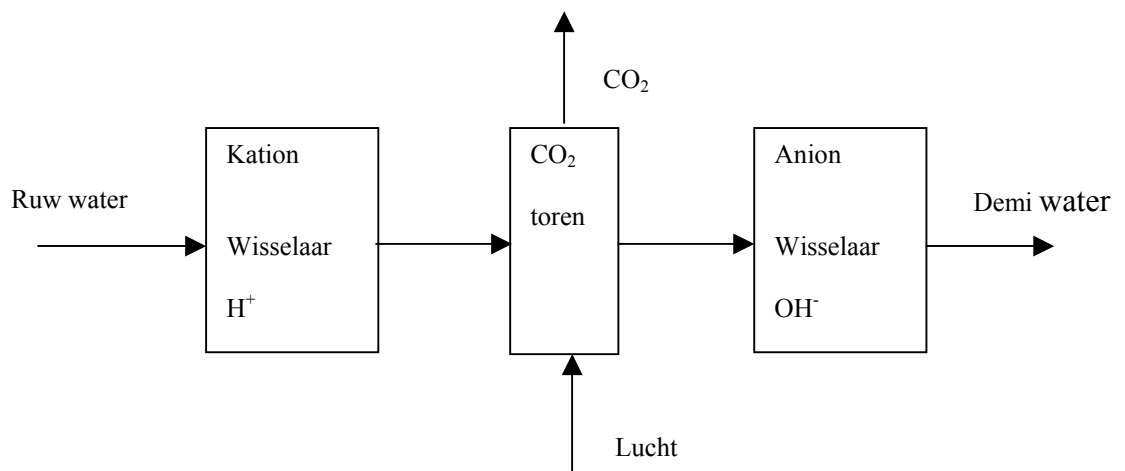
Om het zogenaamde ruw leidingwater geschikt te maken voor ketel voedingwater, moet het water ontdaan worden van diverse hardheidvormers zoals Calcium en Magnesium. We kunnen deze verwijderen met behulp van chemicaliën echter het nadeel daarvan is dat de geleidbaarheid van het water toeneemt. Een toename van de geleidbaarheid als gevolg van chemicaliën resulteert in spuien. Als we echter enkel de hardheidvormers weghalen dan is het water nog niet gedemineraliseerd maar enkel onthard. Ook andere ionen zoals Natrium, Chloor en bijvoorbeeld Sulfaat moeten verwijderd worden.

Ionenwisselaar

Een ander en beter manier is om de genoemde ionen er met behulp van ionen wisselaars uit te halen.

In principe bestaat een dergelijk systeem uit een kationen wisselaar een anionen wisselaar en een Kooldioxide uitdrijftoren.

Een schematische voorstelling van een dergelijk systeem is te zien op afbeelding 1.

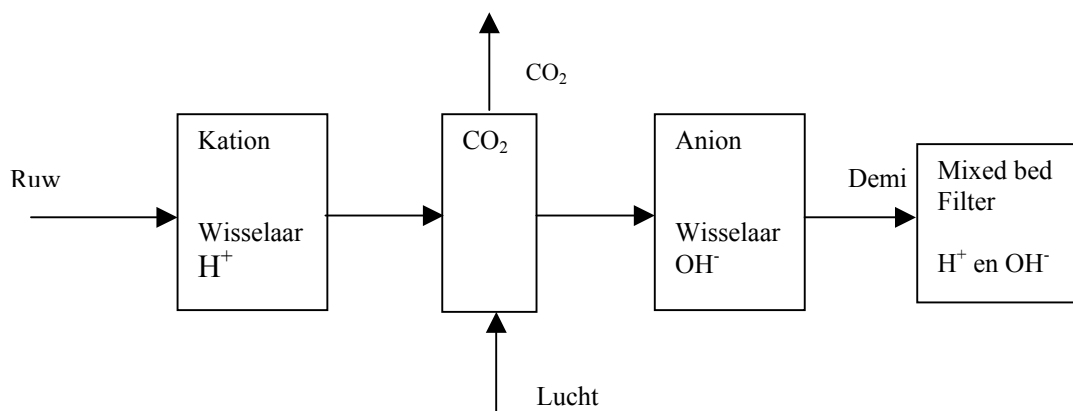


Afbeelding 1. Schematische weergave van een ionenwisselaar.

Mixed bed

Vaak wordt een dergelijk systeem ook nog voorzien van een zogenaamd mixed bed filter, deze bestaat uit een H^+ en een OH^- wisselaar, een dergelijk systeem is afgebeeld op afbeelding 2.

Het mixed bed filter is na het anion filter geplaatst en doet in feite dienst als extra veiligheid.



Afbeelding 2. Schematische voorstelling van een complete demineralisatie straat.

De ionenwisselaars zijn gevuld met hars. Het hars heeft een chemische behandeling ondergaan, het hars in het kation filter is beladen met H^+ ionen en het hars in het anion filter met OH^- ionen. Hetzelfde geldt voor het mixed bed filter. De harsen zijn in staat om ongewenste ionen die in het water aanwezig zijn uit te wisselen tegen H^+ en OH^- ionen.

Preferentie reeks

Hiervoor bestaat een zogenaamde preferentie reeks, ionen met een hogere valentie, of waardigheid, worden eerder uitgewisseld dan die met een lager valentie. Dus in het kation filter zal bijvoorbeeld drie waardig ijzer eerder worden afgevangen dan twee waardig calcium, ditzelfde geldt voor het anion filter, twee waardig sulfaat wordt hier eerder afgevangen dan een waardig chloor. De H^+ en OH^- ionen zijn gekoppeld aan een zogenaamde functionele groep, voor de H^+ ionen noemen we deze groep R en voor de OH^- ionen zullen we deze X noemen.

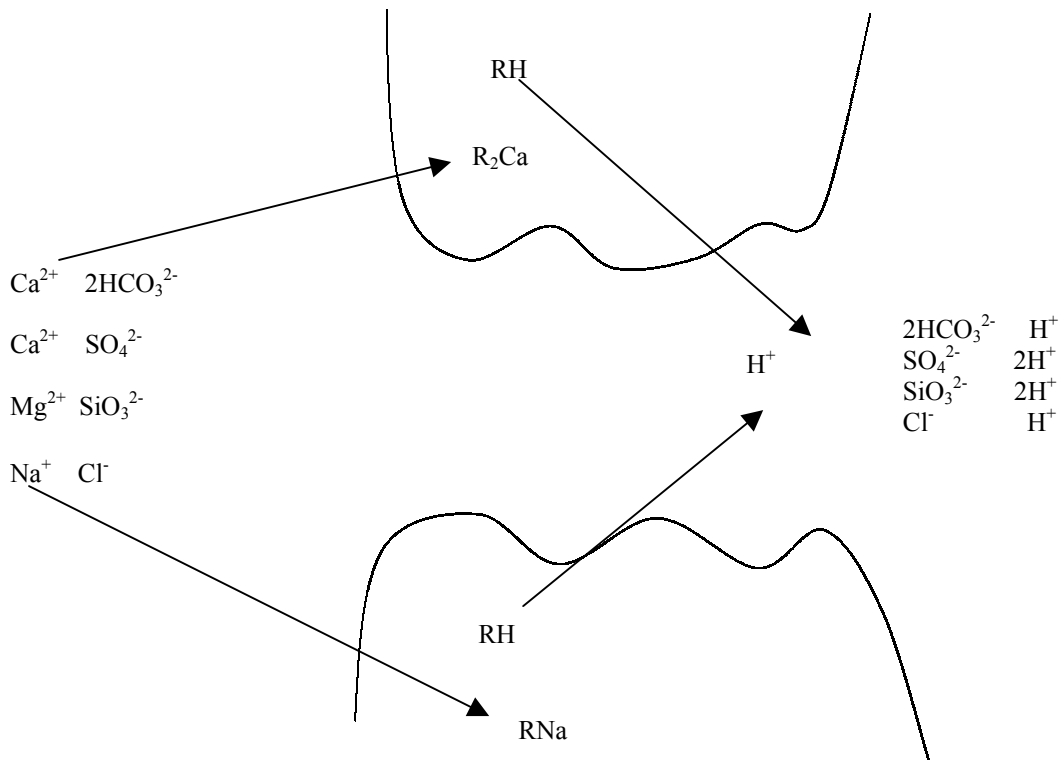
Simpelweg kunnen we stellen dat het hars in het kation filter de samenstelling RH heeft en die in het anionfilter XOH.

In het ruwwater zitten bijvoorbeeld de volgende stoffen:

- Calcium sulfaat, $CaSO_4$
- Magnesium chloride, $MgCl_2$
- Natrium chloride, $NaCl$
- Calcium bicarbonaat, $Ca(HCO_3)_2$
- Magnesium silicaat, $MgSiO_3$

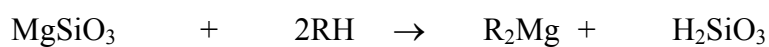
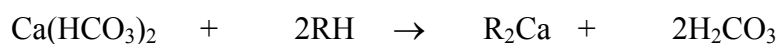
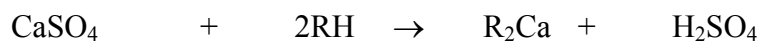
13.2 Kation

We zullen eerst het kation filter nader bekijken, we stellen ons nu twee harskorrels voor waardoor het water wordt getransporteerd. De harskorrels noemen we nu RH, zie afbeelding 3.



Afbeelding 3. Principe van kation wisselaar.

We zien in deze afbeelding dat de positieve ionen, Calcium, Magnesium en Natrium hier gewisseld worden voor de Waterstof ionen. De negatieve ionen gaan gewoon door. We kunnen de volgende reactievergelijkingen opstellen:



Uit de vergelijkingen volgt dus dat er verschillende zuren gevormd worden, kortom het water wordt zuur.

Zure wisselaar	Om deze reden wordt een kation filter ook wel een zure wisselaar genoemd, in dit geval een sterk zure wisselaar.
Natrium	Het kation filter zal bijna altijd een gedeelte Natrium doorlaten, de hoeveelheid is afhankelijk van het feit hoe ver het hars reeds beladen is.

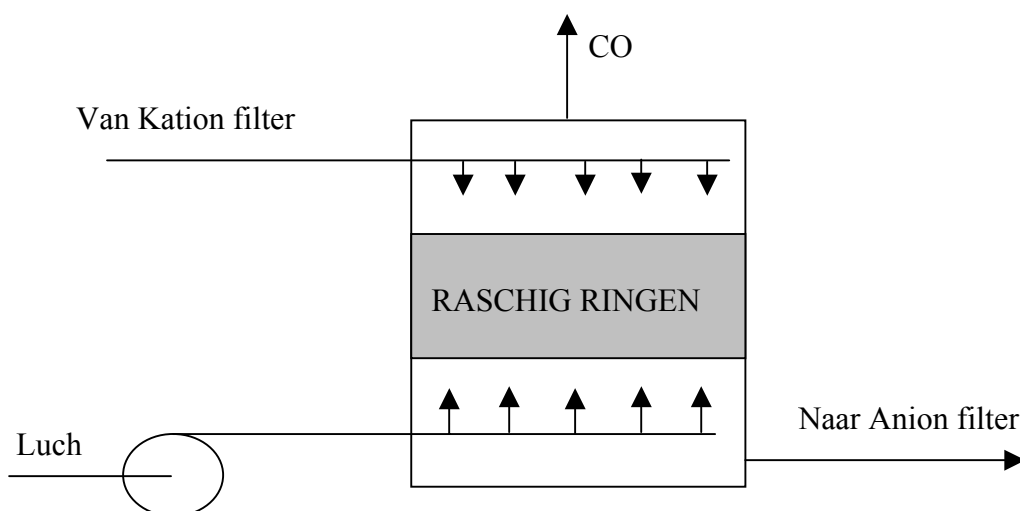
13.3 CO₂ uitdrijf toren

Het gevormde H₂CO₃ (Koolzuur) is zeer instabiel en valt uiteen in:



Het gevormde CO₂ kan nu in de CO₂ uitdrijf toren verwijderd worden met behulp van lucht, zie afbeelding 4.

Het water wordt aan de bovenzijde toegevoerd, de lucht aan de onderzijde. De toren is gevuld met zogenaamde Raschig ringen. De stroming is in tegenstroom en door de Raschig ringen wordt het contact oppervlak vergroot.

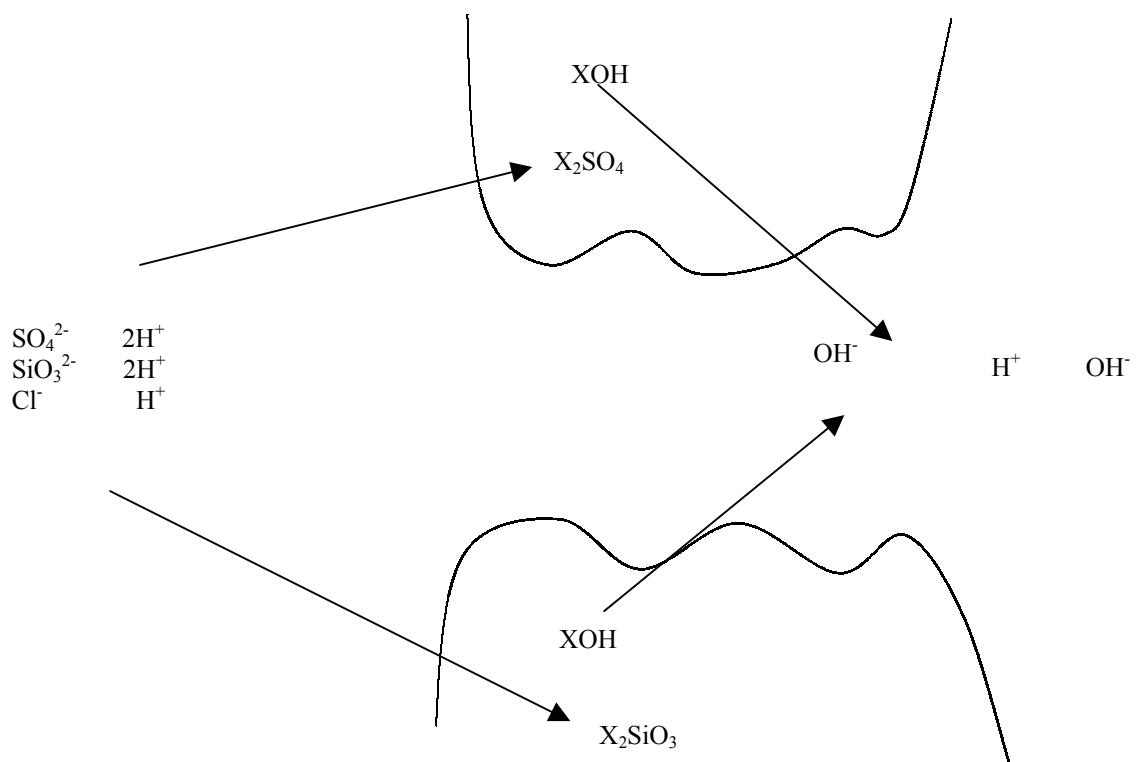


Afbeelding 4. De CO₂ uitdrijf toren.

De lucht wordt met behulp van een ventilator in de toren geblazen en neemt op zijn weg naar boven de gevormde kooldioxide mee en voert deze af naar de atmosfeer. De andere gevormde stoffen in het kation filter blijven in het water aanwezig en vervolgen hun weg naar het anion filter.

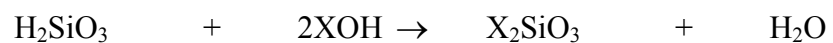
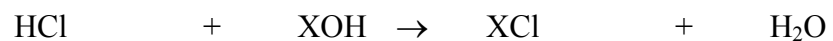
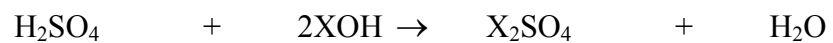
13.4 Anion wisselaar

We zullen nu het anion filter nader bekijken, we stellen ons nu twee harskorrels voor waardoor het water wordt getransporteerd. De harskorrels noemen we nu XOH, zie afbeelding 5.



Afbeelding 5. Het anion filter.

We zien in deze afbeelding dat de negatieve ionen worden gewisseld met de Hydroxyl ionen. We kunnen de volgende reactievergelijkingen opstellen:



Het resultaat is dat we na het anion filter puur water overhouden.

Na het anion filter volgt nog een mixed bed filter. Eventuele niet afgevangen stoffen, slip, worden hier nog uitgewisseld, de reactie vergelijkingen zijn reeds in het voorgaande gegeven.

Met de OH^- wisselaar wordt nu dus ook het Silicaat afgevangen.

Let wel bij het kation filter hebben we reeds gezegd dat er een gedeelte Natrium doorlekt, dit zelfde gebeurt uiteraard in het anion filter, het Natrium wordt hier immers niet afgevangen.

Het Natrium zal met de OH⁻ ionen dus basisch regeren, om deze reden is het water na de anion wisselaar vaak ligt basisch.

Door dit basische karakter zal er ook een gedeelte van het Silicaat doorlekken. Zodra een gedeelte van het Silicaat doorlekt zal dit resulteren in een tijdelijke afname van de geleidbaarheid, vervolgens stijgt deze geleidbaarheid snel.

Na₂SiO₃

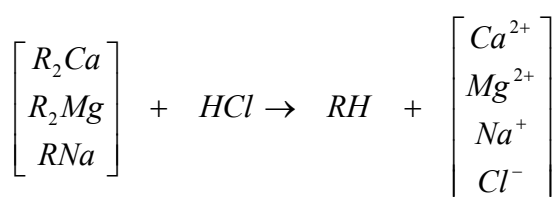
De verklaring hiervoor is als volgt:

Tijdens normaal bedrijf heeft het gevormde natronloog een grote invloed op de geleidbaarheid, als er echter eenmaal silicaat doorlekt, dan reageert het Natrium met het Silicaat tot Natriumsilicaat, de base is dus niet meer aanwezig. Het natriumsilicaat heeft een slechtere geleidbaarheid dan het Natronloog, kortom de geleidbaarheid daalt. Als het anion bed nu verder uitgeput, lees verzadigd, raakt zullen andere negatieve ionen doorlekken, het gevolg hiervan is dat de geleidbaarheid zeer snel oploopt. Het filter moet dan geregenereerd worden.

13.5 Regenereren

Als het kation filter en het anion filter verzadigd zijn moeten ze uit bedrijf en geregenereerd worden. Met het kation filter geschiedt dit met behulp van zoutzuur, bij het anionfilter met behulp van natronloog.

Bij het kation filter gaat dit als volgt:



En voor het anion filter:

