29/03/2012

Membranen en nieuwe technologie

Wilrijk, 27 februari, 2012

Ludo Diels

DPSIR-analysis of global problems

DRIVERS lead to..

PRESSURES on..

Growing Population & Way of Living[1)]

Successful structural changes need radical transitions in central societal systems

DRIVERS lead to..

Growing Population & Way of Living[1)]

PRESSURES on..

- Scarcity of Resources
- Climate Change
- Environmental Contamination
- Decreasing Biodiversity

..STATE of Key Societal systems

..ultimately leading to respective visible IMPACTS (illustrative examples)

..STATE of Key Societal systems	IMPACTS (illustrative examples)
Energy Production & Distribution	• Security of Supply issues • High Fossile Fuel prices • Inefficient distribution and storage
Transport & Mobility	• Traffic Jams • Car/ship/plane emissions
Industrial Processes (Materials/ Chemicals)	• Water pollution; Waste • Inefficient useage of materials • Production inefficiencies
Urban development	• Low energy efficiency in housing • Waste and wastewater
Rural development	• Deforestation • Water scarcity and wastewater • Food supply

While Solutions or "Responses" are at hand at each stage, a transition will really be successful when the need of acting end-of-pipe disappears

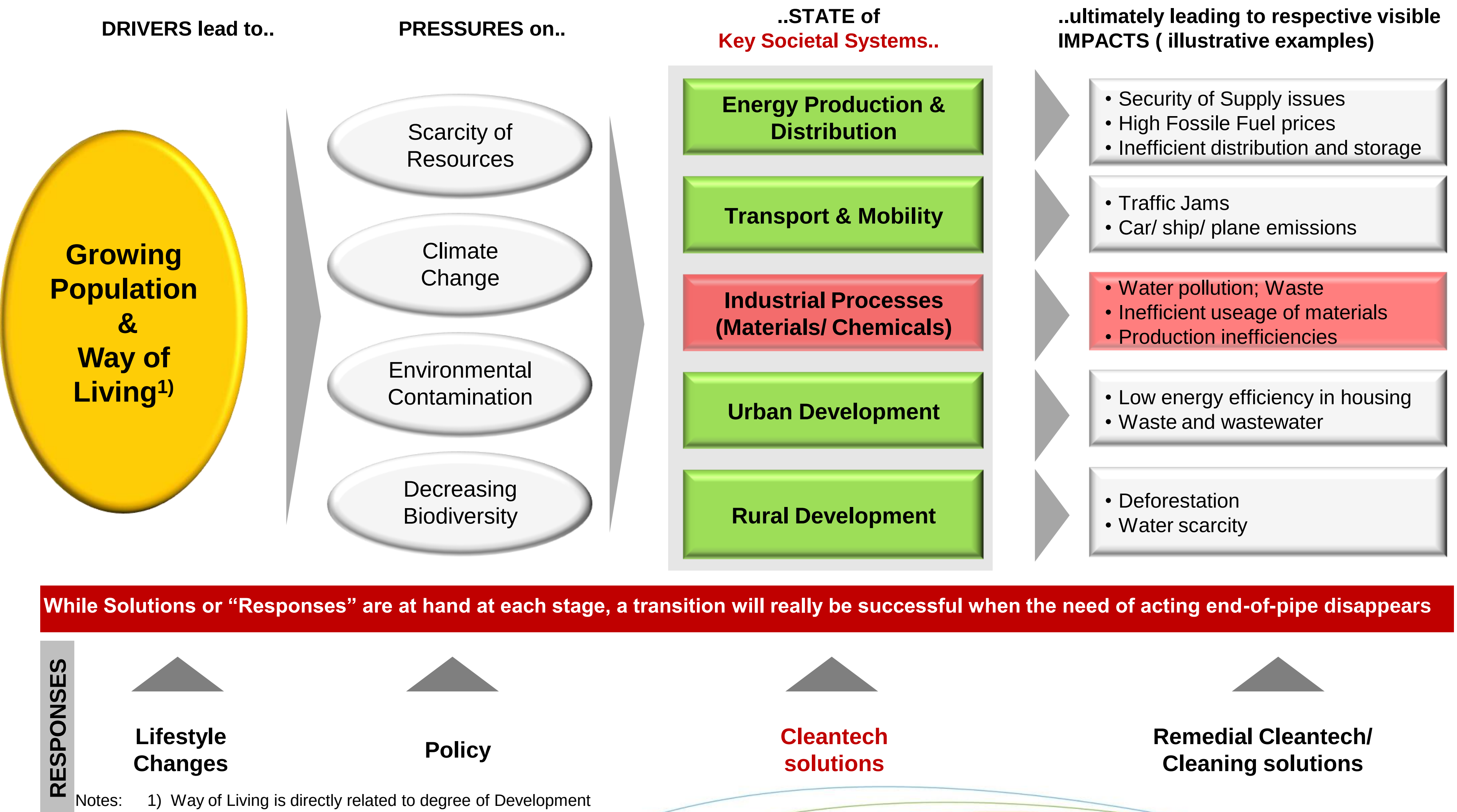
RESPONSES

- **Lifestyle Changes**
- **Policy**
- **Cleantech solutions**
- **Remedial Cleantech/ Cleaning solutions**

vito
vision on technology

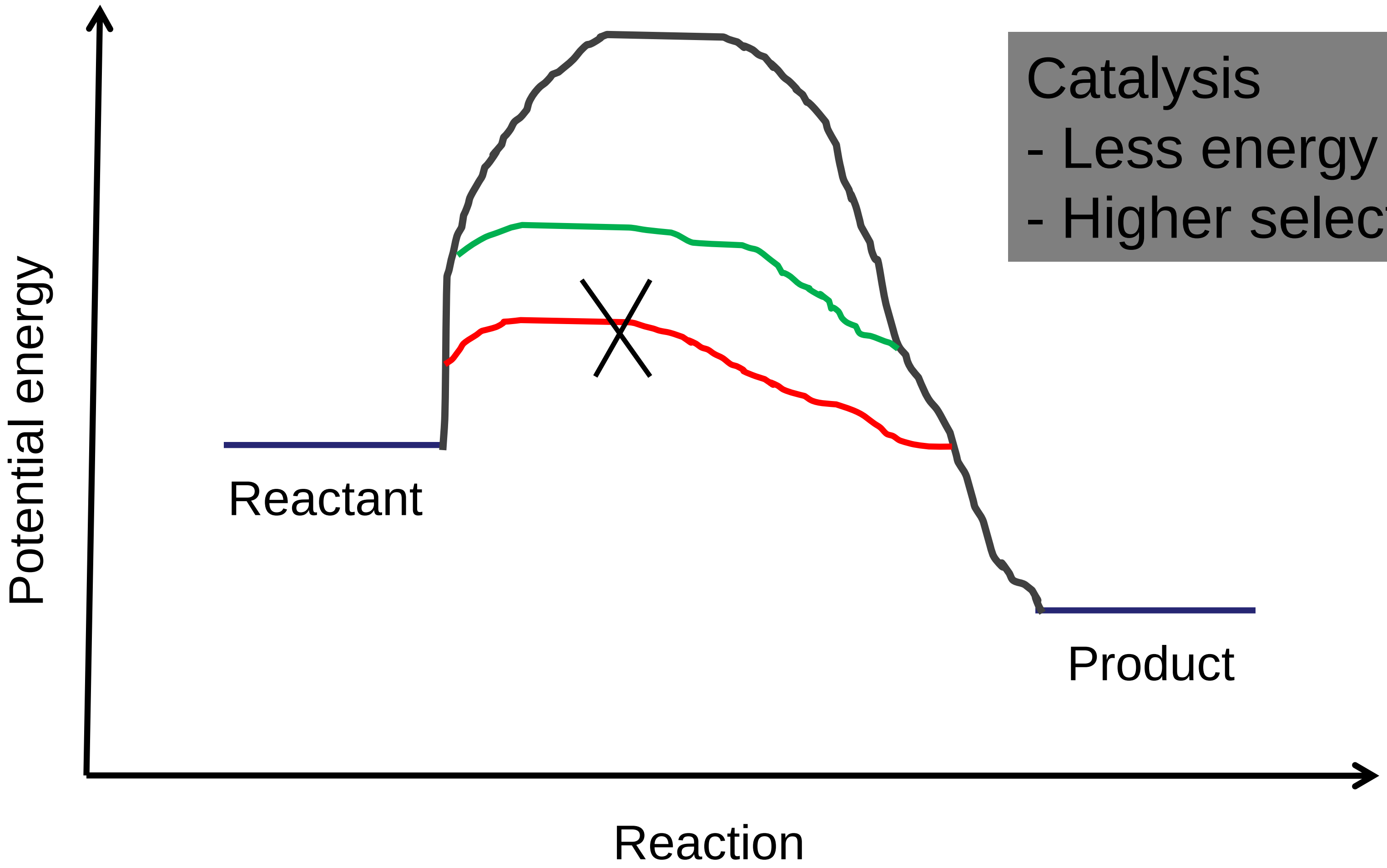
Notes: 1) Way of Living is directly related to degree of Development

REAL CHANGE = TRANSITIONS, NOT OPTIMISATIONS



Notes: 1) Way of Living is directly related to degree of Development

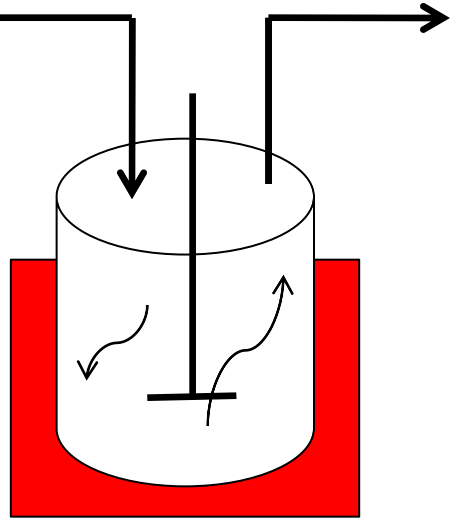
Maximize the effectiveness of inter and intramolecular reactions

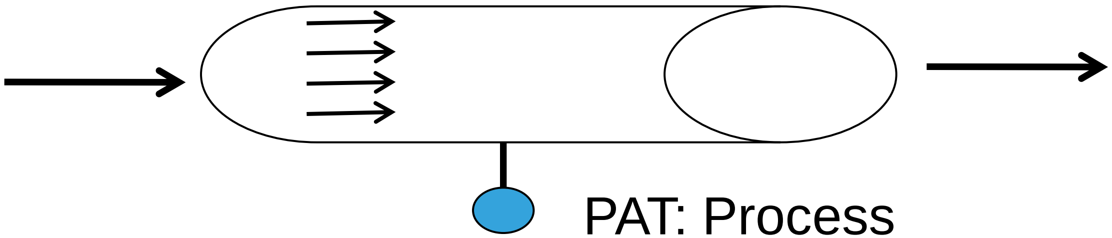


Catalysis
- Less energy
- Higher selectivity

vito
vision on technology

Give each molecule the same processing history



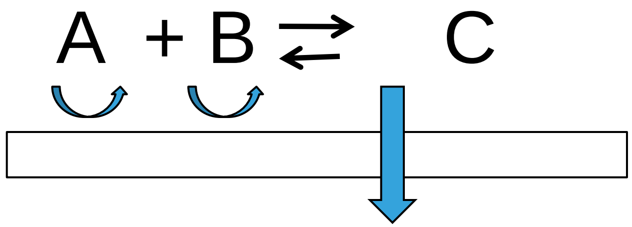


PAT: Process Analytics Technology

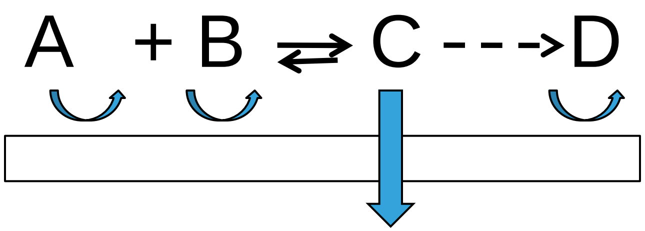
Reactor Module
—To address one process step

vito
vision on technology

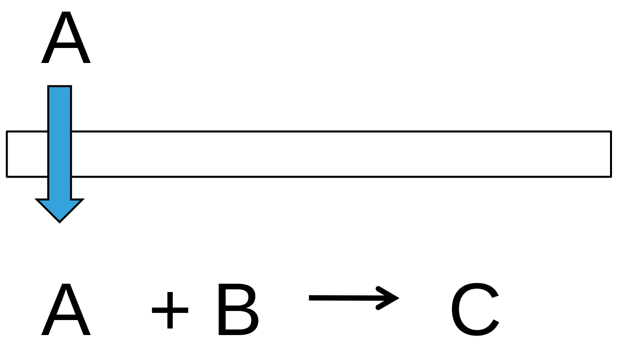
Process intensification: In situ product recovery



Change in equilibrium



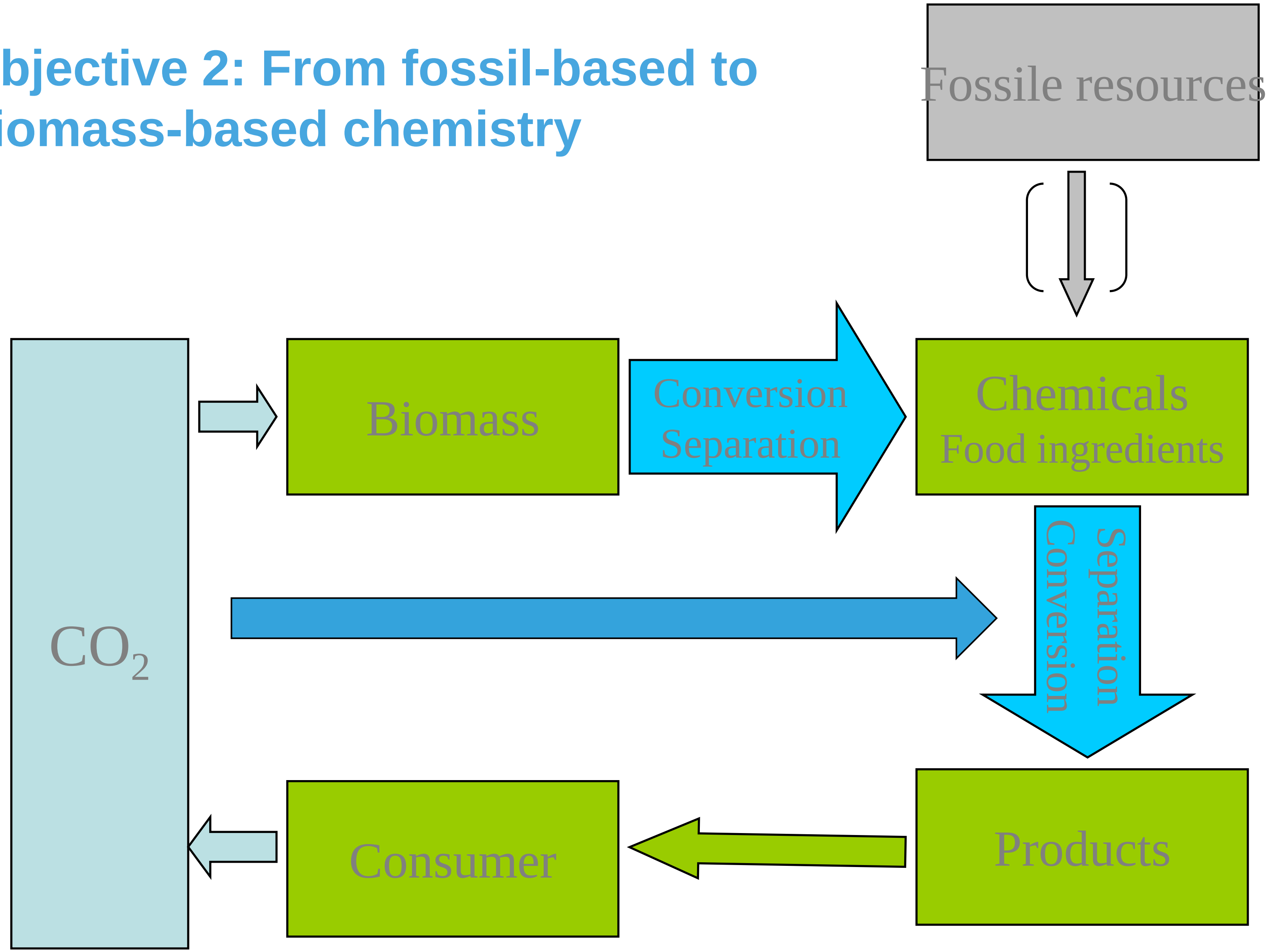
Avoiding further reactions



Dosing chemicals to control the right reaction

vito
vision on technology

Objective 2: From fossil-based to biomass-based chemistry



OUTLINE

1. Inleiding

2. Membranen / Modules en ontwerp

3. Procesparameters en fouling

4. Overzicht waterige membraantoepassingen

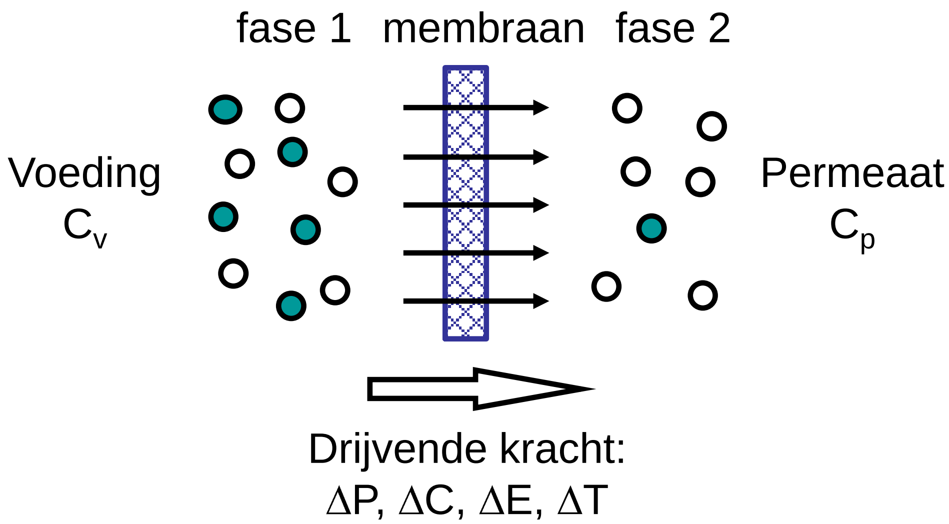
5. Case-studies membranen voor waterzuiveringstoepassingen

6. Overzicht en case-studies niet-waterige membraantoepassingen

7. Conclusies

DEFINITIE MEMBRAAN

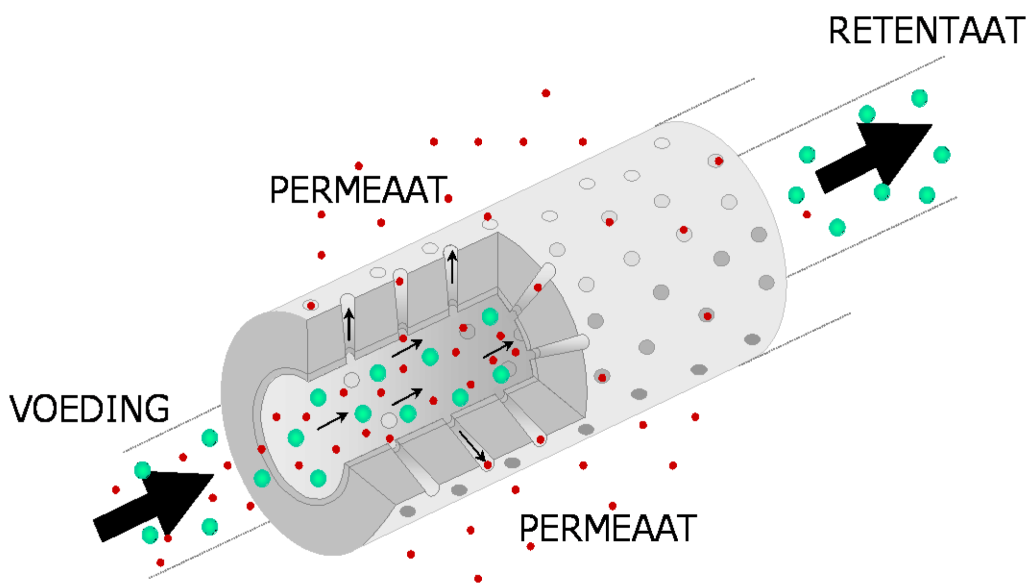
✓ Semi-selectieve barrière tussen twee fasen



✓ Efficiëntie bepaald door

- Permeabiliteit of flux
- Selectiviteit of retentie

DEFINITIE MEMBRAAN



PORIËNBEREIK

Proces	Soort deeltje	Dimensies (nm)
	gist en fungi	1000 - 10000
MF	bacteriën	300 - 10000
	olie emulsies	100 - 10000
	colloidale deeltjes	100 - 1000
	virussen	30 - 300
UF	proteïnen/polysacchariden (10^4-10^6 Da)	2 - 10
	enzymes (10^4 10^5Da)	2 - 5
NF	klassieke antibiotica (300 – 1000 Da)	0.6 - 1.2
	organische moleculen (30 – 500 Da)	0.3 - 0.8
RO	anorganische ionen (10 – 100 Da)	0.2 - 0.4
	water (18 Da)	0.2

DRUKGEDREVEN MEMBRAANPROCESSEN

Proces	Tegengehouden componenten	Druk	Poriegrootte
RO	99% voor meeste ionen Meeste organische componenten > 150 Da	10 – 100 bar	Dens
NF	95% voor divalente ionen 40% voor monovalente ionen Organische componenten > 300 Da	5 – 20 bar	~1 nm
UF	Meeste organische componenten > 1000 Da	1 – 5 bar	2 – 100 nm
MF	Gesuspendeerde deeltjes > 0.1 µm	0.1 – 3 bar	0.1 – 20 µm

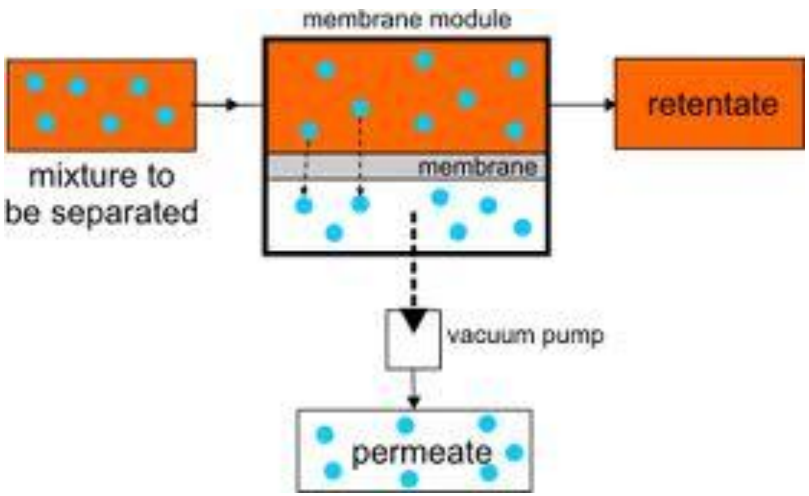
MEMBRAANFILTRATIEPROCESSEN

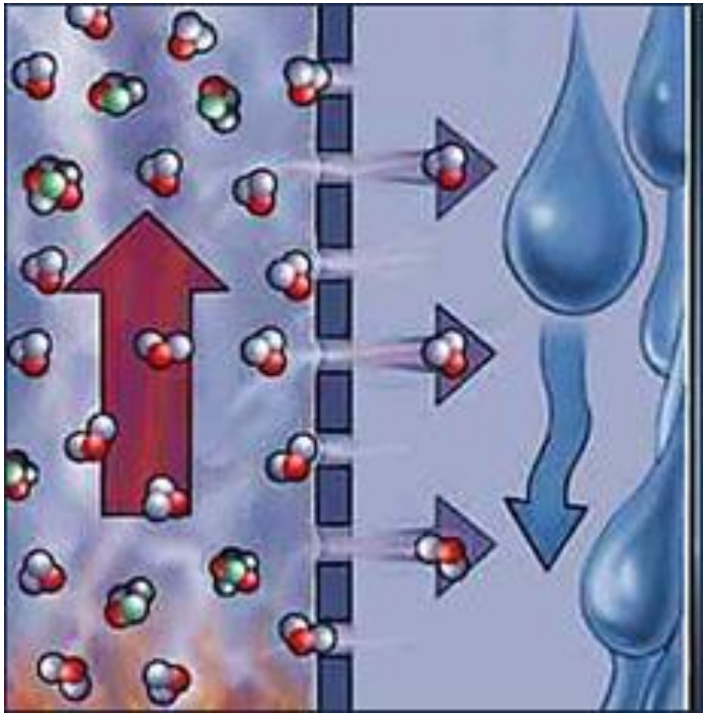
Proces	Drijvende kracht	Scheiding	Toepassing
Microfiltratie (MF)	ΔP	grootte	bacteriënfilter (sterilisatie)
Ultrafiltratie (UF)	ΔP	grootte	eiwitconcentratie, olie/water scheiding, klaring
Nanofiltratie (NF)	ΔP	grootte + lading	ontharden water, verwijderen micropolluenten
Omgekeerde osmose (RO)	ΔP	oplos/diffusie	ontzouting, productie ultrapuur water
Elektrodialyse (ED)	ΔE	lading	verwijdering ionen uit water, scheiden AZ
Gasscheiding (GS)	ΔP	oplos/diffusie	O_2/N_2, CO_2/H_2 scheiding, verwijderen NO_x
Pervaporatie (PV)	Δp (activiteit)	oplos/diffusie	verwijderen vluchtige componenten
Membraandistillatie (MD)	$\Delta T/\Delta P$	damp-vloeistof evenwicht	productie puur water, verwijderen VOCs
Vloeibare membranen (LM)	activiteit	oplosbaarheid/ affiniteit	verwijderen metaalionen uit water, zure gassen uit lucht

vito
vision on technology

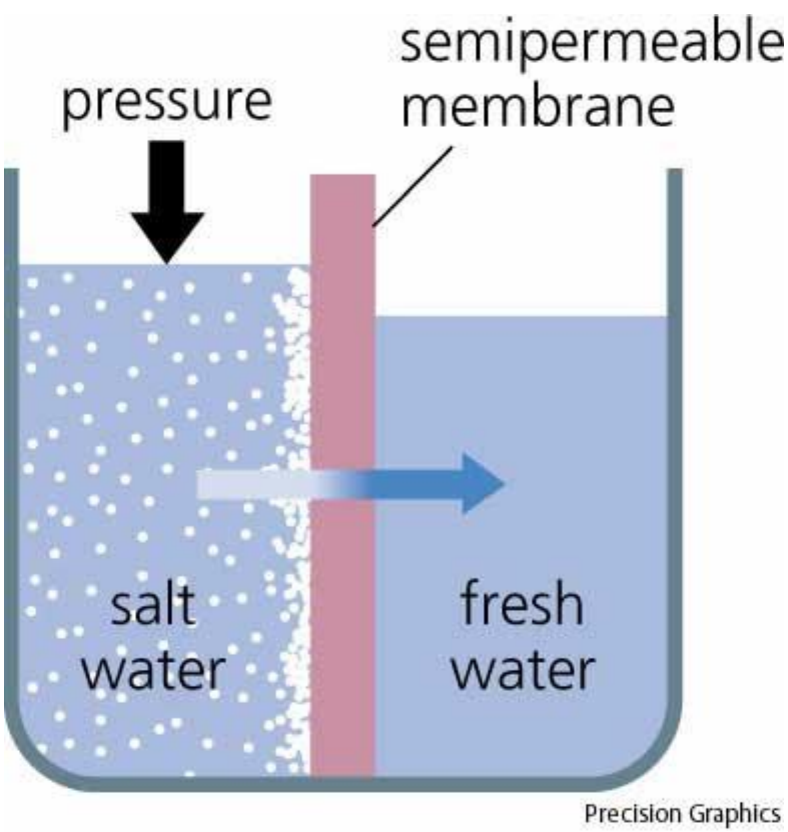
Pervaporation

Membrane destillation

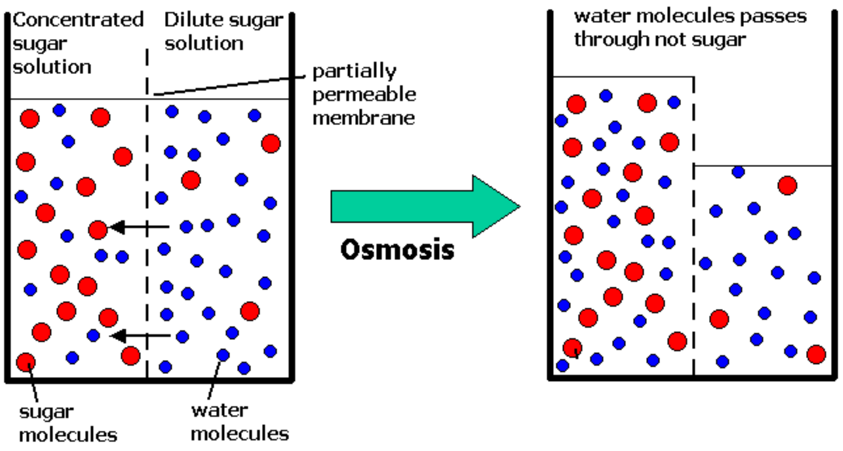


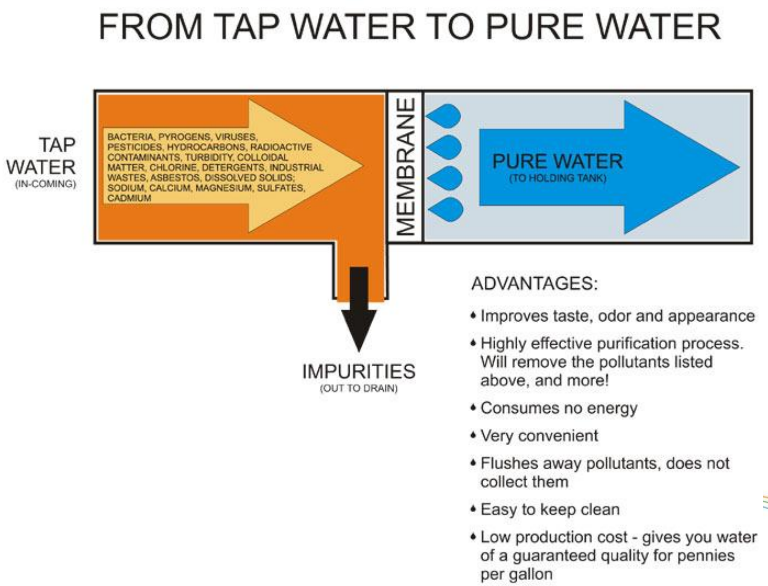


Reverse osmosis



(Forward) Osmosis





ED Principles

- Dialysis: process of solute transport through a membrane when solute activity (concentration) is higher on one side of the membrane

  = solute diffusion from a concentration gradient
- Electrodialyis (ED): process of ion transport through a membrane as a result of an electrical field across the membrane

  = ion transport is possible against a concentration gradient (desalination)
- Remark:

  osmosis = desalination with transport of water through the membrane

  electrodialysis = desalination with transport of solute through the membrane

vito
vision on technology

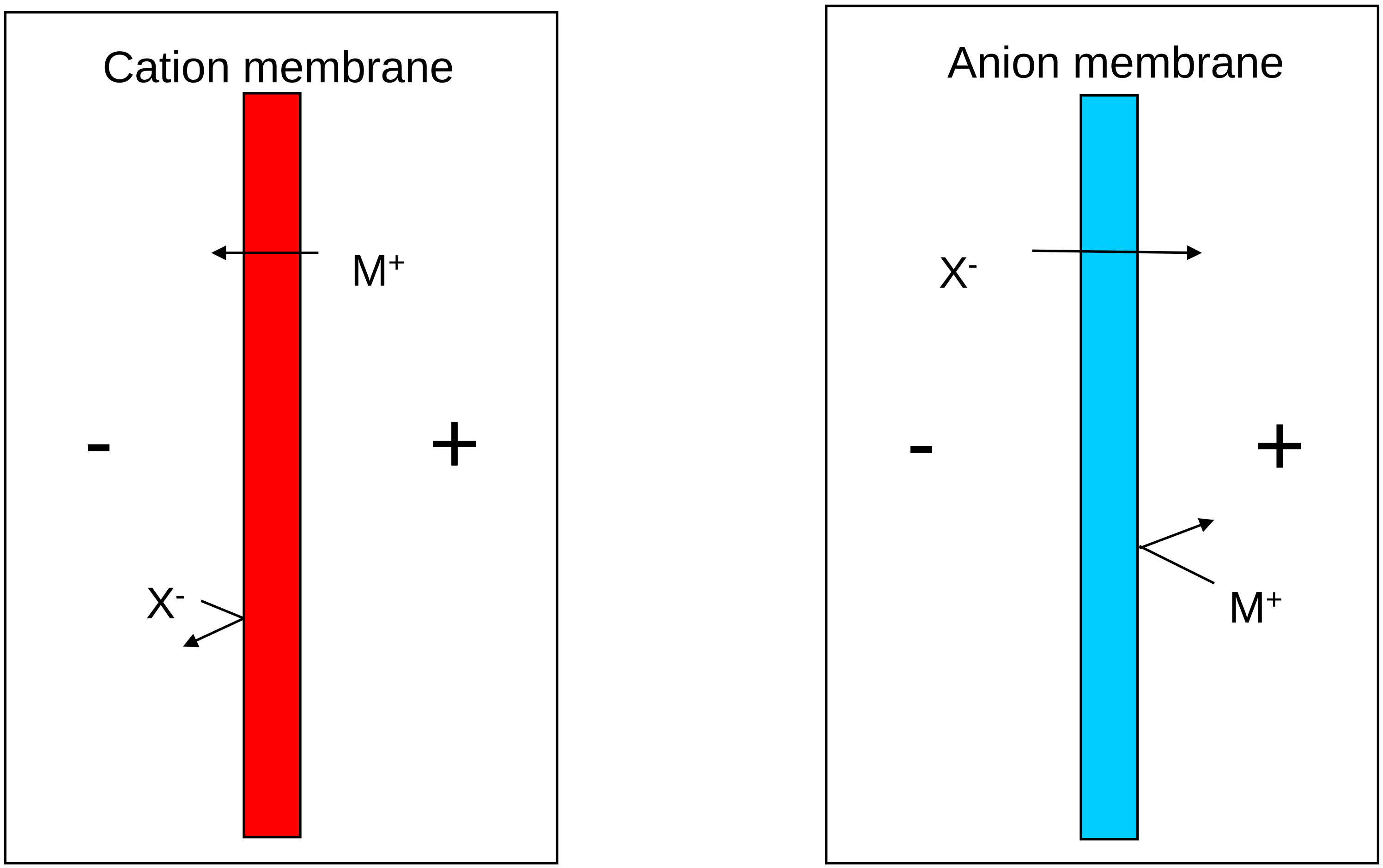
ED Membranes

- Cation selective membranes (CM)
  - polymer chains with fixed negative groups (SO^{3-}, COO^{-}, PO_3^{2-}, HPO^{2-}, AsO_3^{2-}, SeO^{3-})
  - allow cations to diffuse through the CM membrane

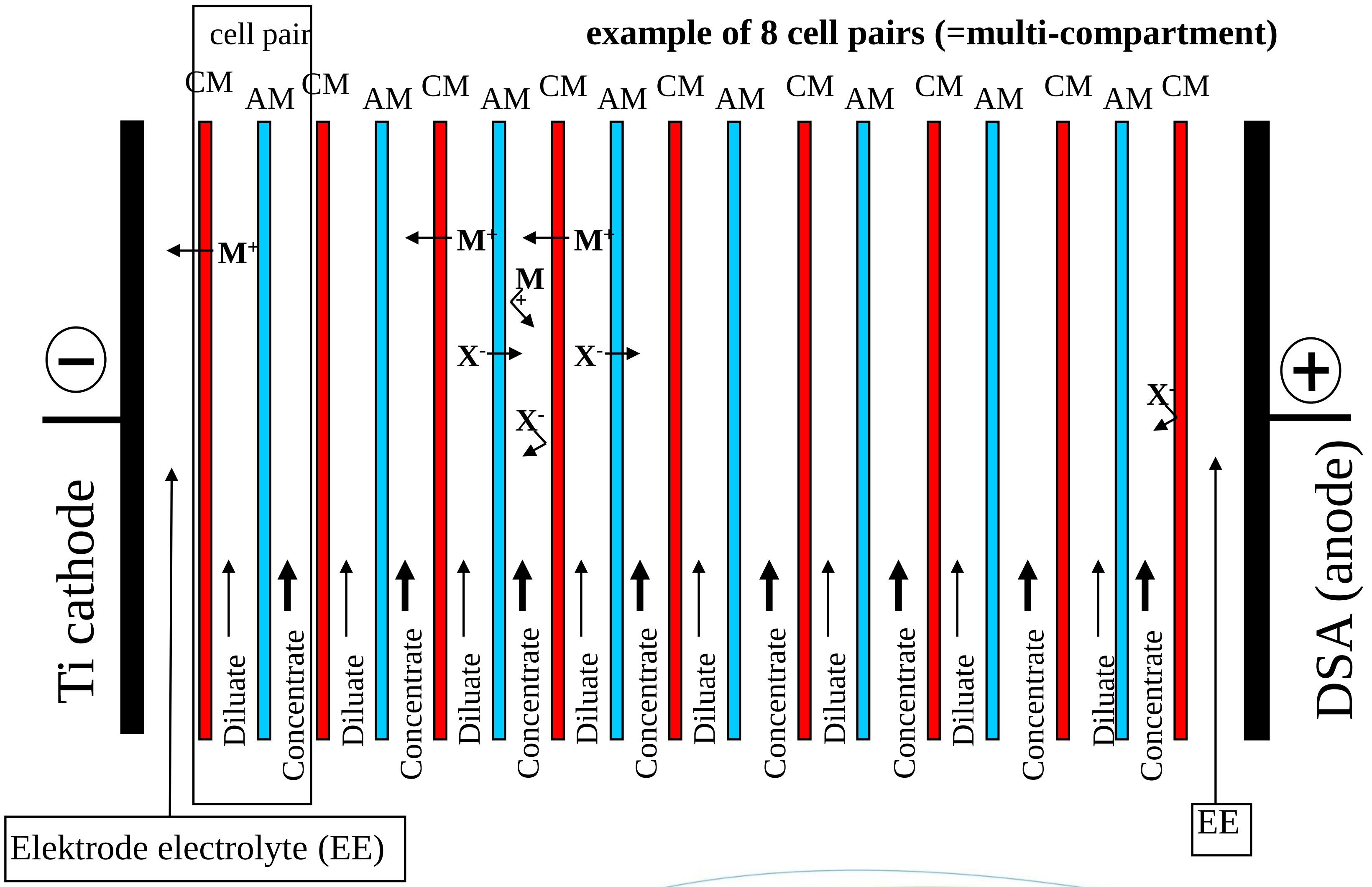
- Anion selective membranes (AM)
  - polymer chains with fixed positive groups (NH^{3+}, RNH_2^{+}, R_3N^{+}, R_3P^{+}, R_2S^{+})
  - allow anions to diffuse through the AM membrane

vito
vision on technology

ED Principles

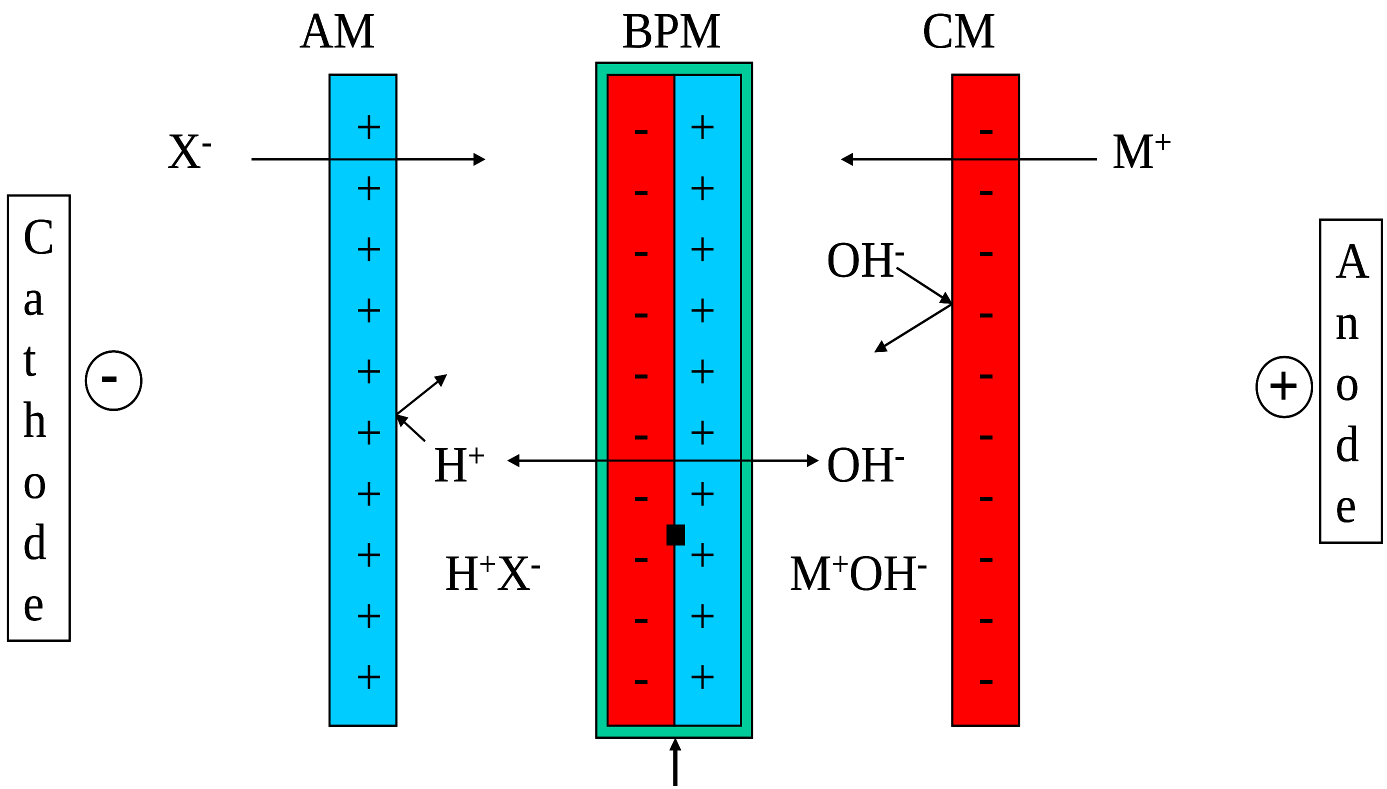


ED Stack



cell pair
example of 8 cell pairs (=multi-compartment)
CM
AM
M+
X-
Ti cathode
DSA (anode)
Diluate
Concentrate
Elektrode electrolyte (EE)
EE

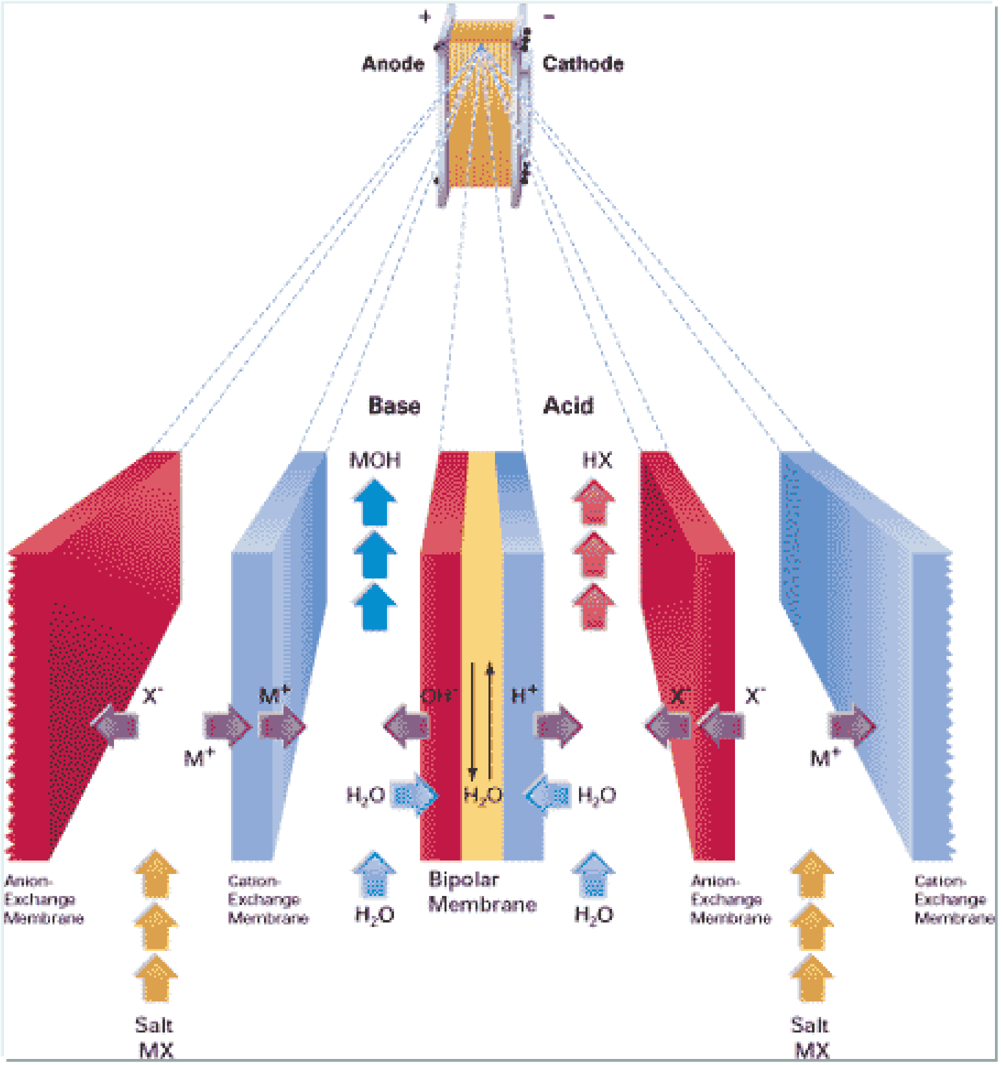
Bipolar membranes



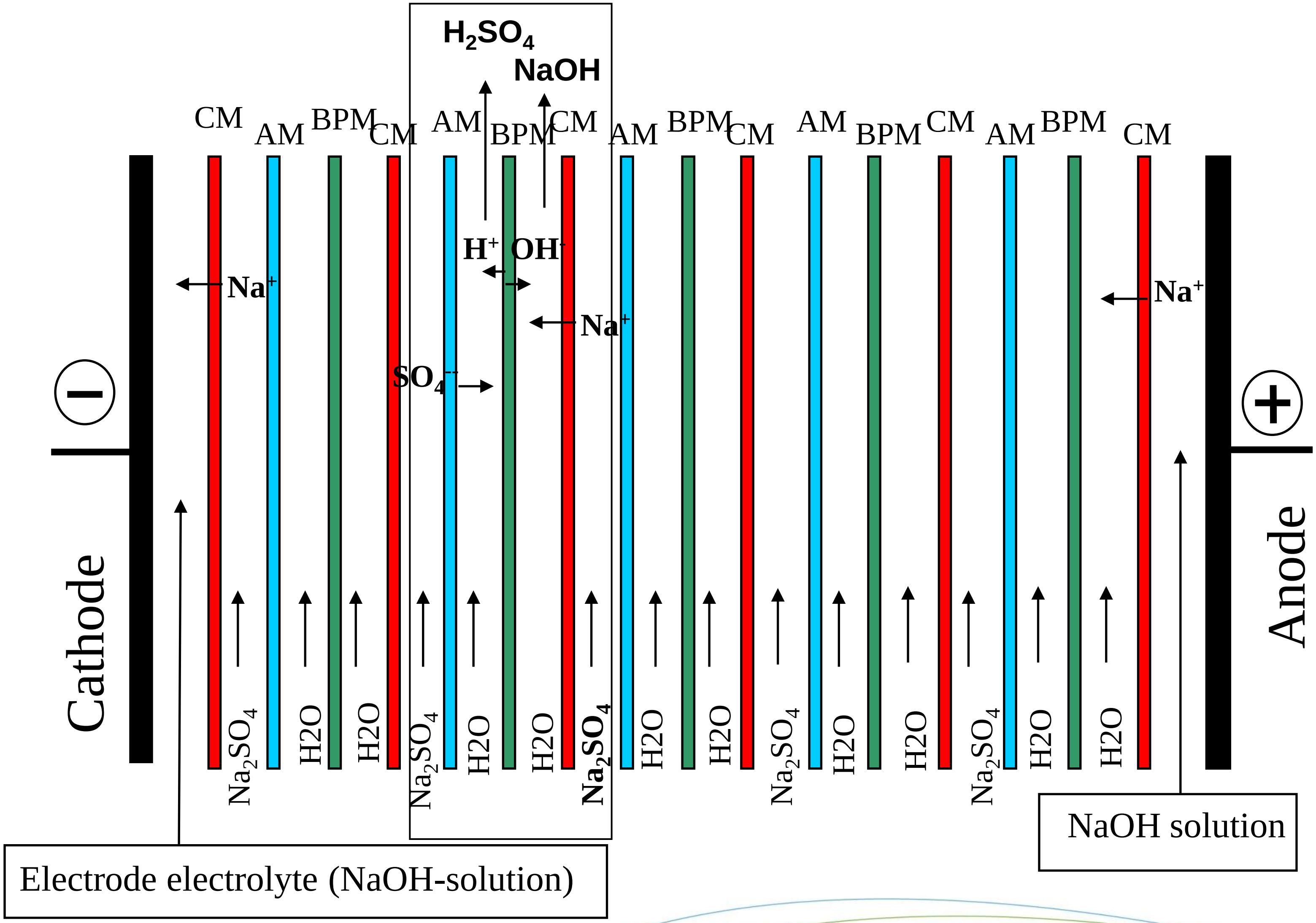
Extreme efficient dissociation of H_2O in OH^- and H^+ at transition zone

vision on technology

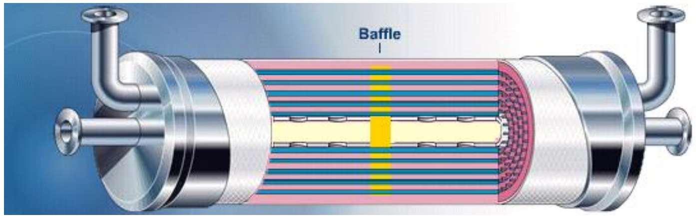
Bipolar membranes



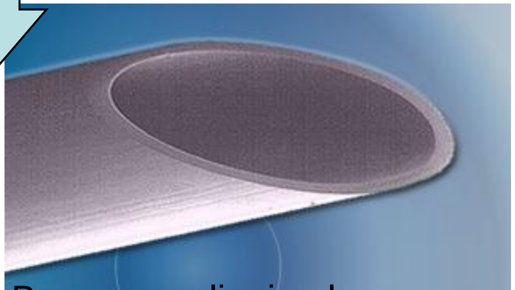
ED BPM of sodium sulphate



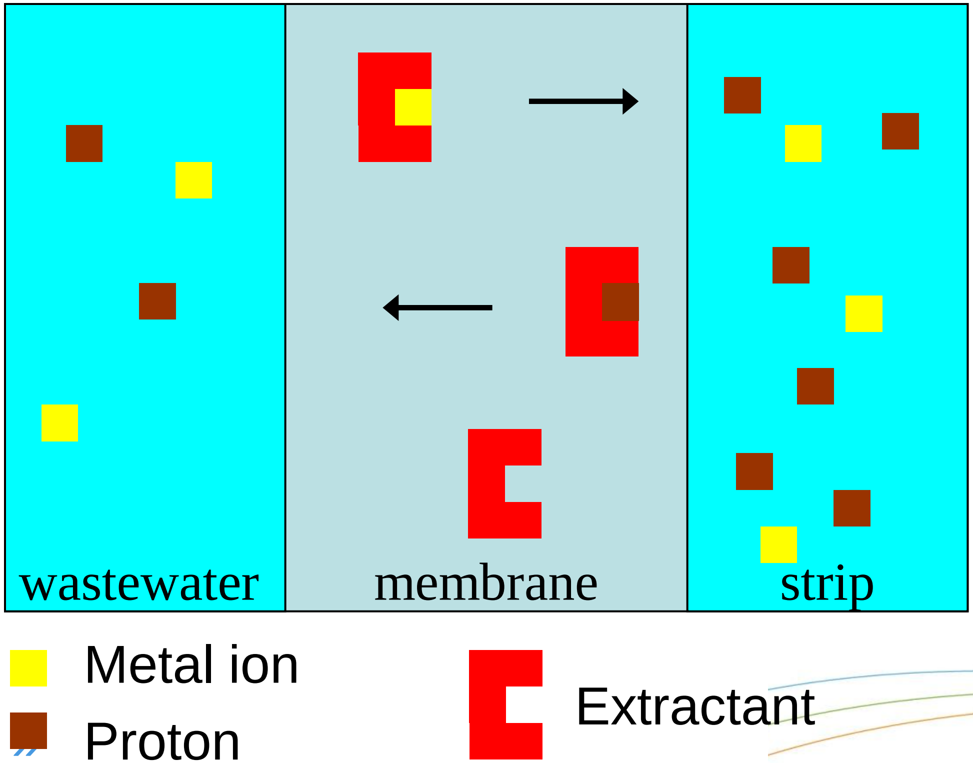
Supported Liquid Membranes (SLM)



Bron : www.liqui-cel.com



Bron : www.liqui-cel.com

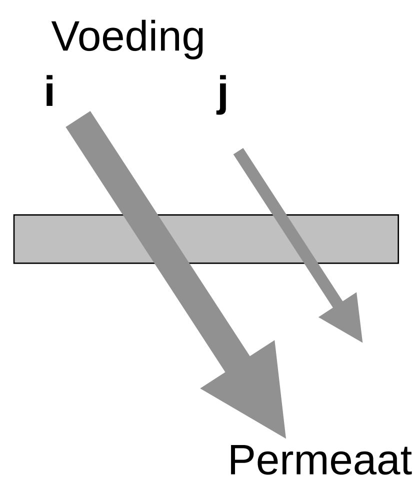


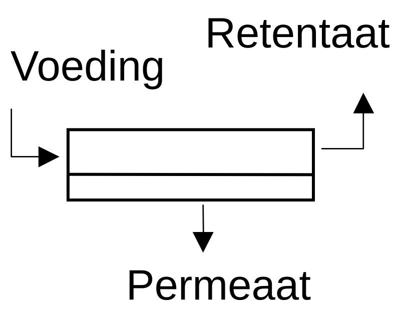
OUTLINE

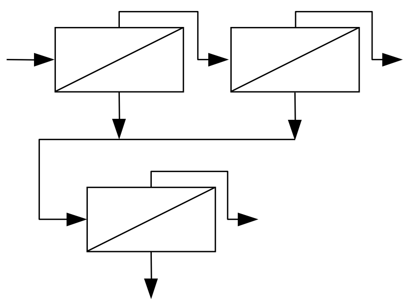
1. Inleiding
2. **Membranen / Modules en ontwerp**
3. Procesparameters en fouling
4. Overzicht waterige membraantoepassingen
5. Case-studies membranen voor waterzuiveringstoepassingen
6. Overzicht en case-studies niet-waterige membraantoepassingen
7. Conclusies

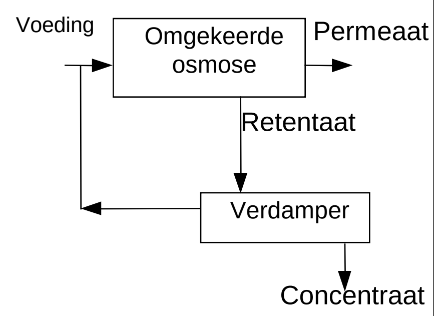
PROCESONTWERP

Membraan element	Module	Module schikking	Membraan proces









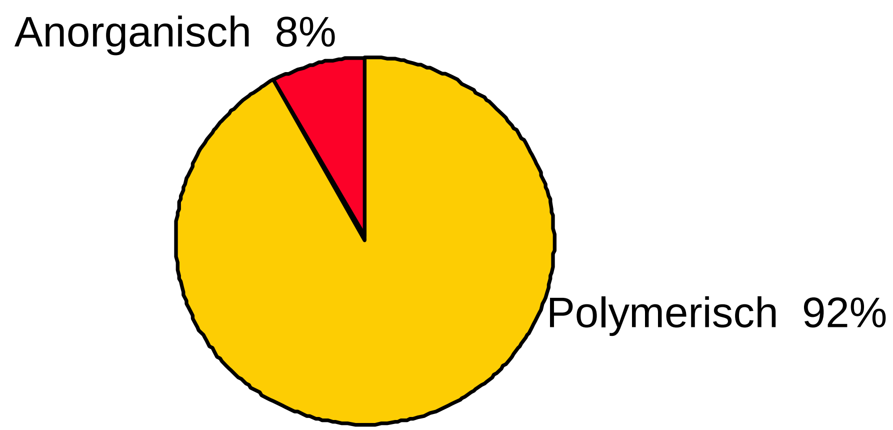
R. Rautenbach, Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung

MEMBRAANKLASSIFICATIE

- **Materiaal**
  - Organisch: polymeren
  - Anorganisch: keramisch, koolstof, metaal, glas
  - Mixed matrix, hybride: polymeer + anorganische vullers
- **Morfologie**
  - Poreus vs dens
  - Homogeen vs heterogeen: alle poriën gelijk vs niet gelijk
  - Symmetrisch vs asymmetrisch: alle poriën aan één zijde groter dan aan de andere
- **Poriegrootte**
  - MF, UF, NF, RO
- **Affiniteit**
  - Hydrofiliciteit/hydrofobiciteit
  - Lading
  - Functionele groepen
- **Uitvoeringsvorm**
  - Vlakke membranen: plate-and-frame, spiraalgewonden module
  - Tubulaire membranen: tubulaire en capillaire modules, holle vezels

MEMBRAANMATERIALEN

Verdeling West-Europese markt naar type membraanmateriaal



Membraansynthesetechnieken

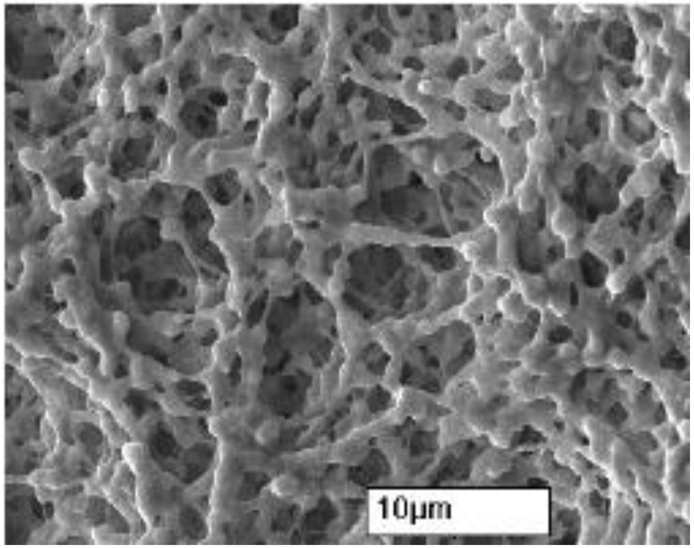
- ✓ Fase-inversie
- ✓ (Stretching)
- ✓ (Track-etching)
- ✓ Coating
- ✓ (Sol-gel synthese)

HOE MAAK JE EEN MEMBRAAN?

1. Fase – inversie techniek

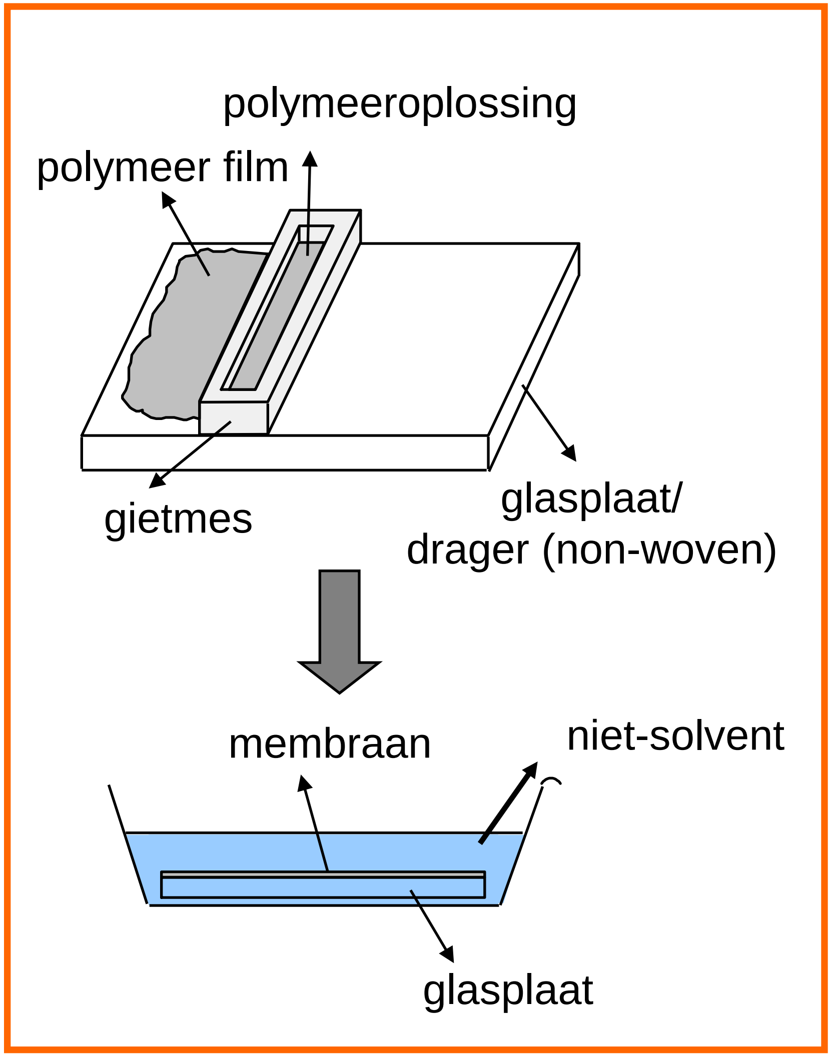
- ✓ Eenvoudig, veelzijdig proces
- ✓ Gecontroleerd door thermodynamische en kinetische parameters
- ✓ Geïnduceerd door niet-solvent, damp of temperatuur
- ✓ Grote variatie aan membraan morfologieën

➔ *Meest gebruikte, flexibele techniek*

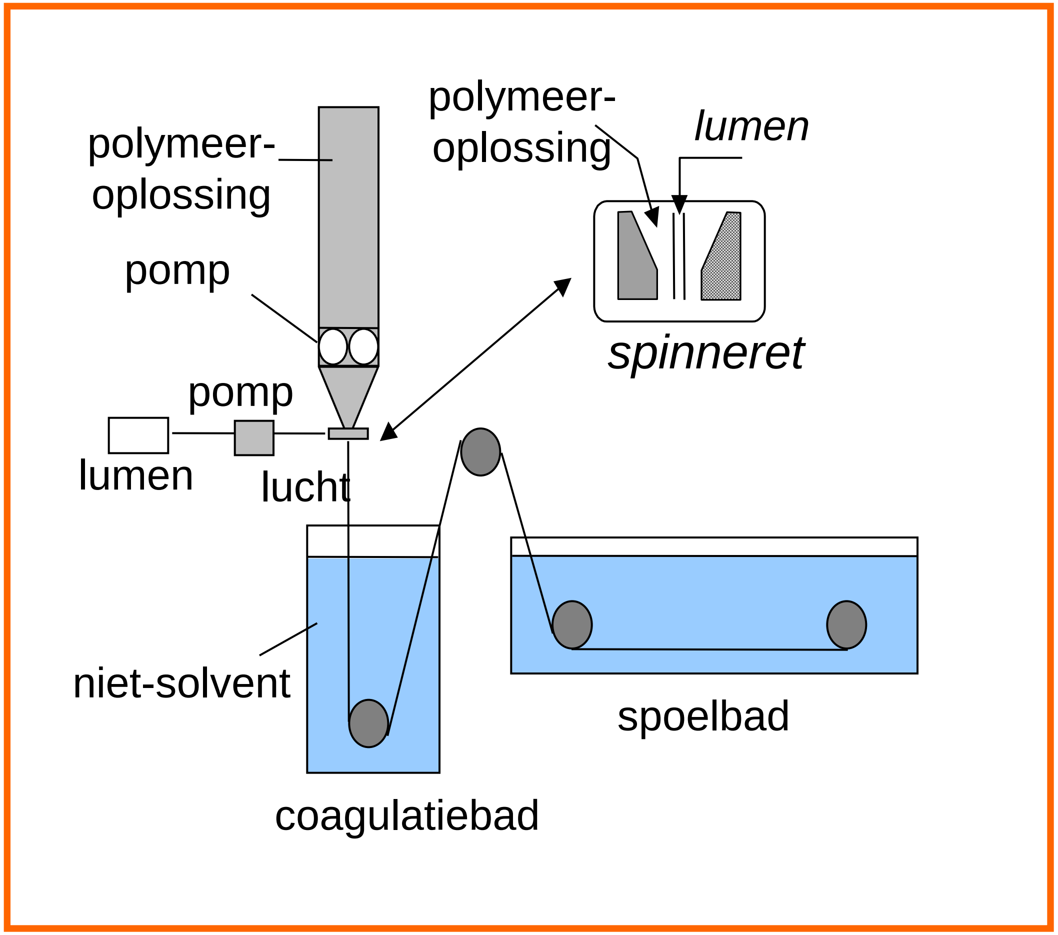


MF fase-inversie membraan

GIETEN VAN VLAKKE MEMBRANEN

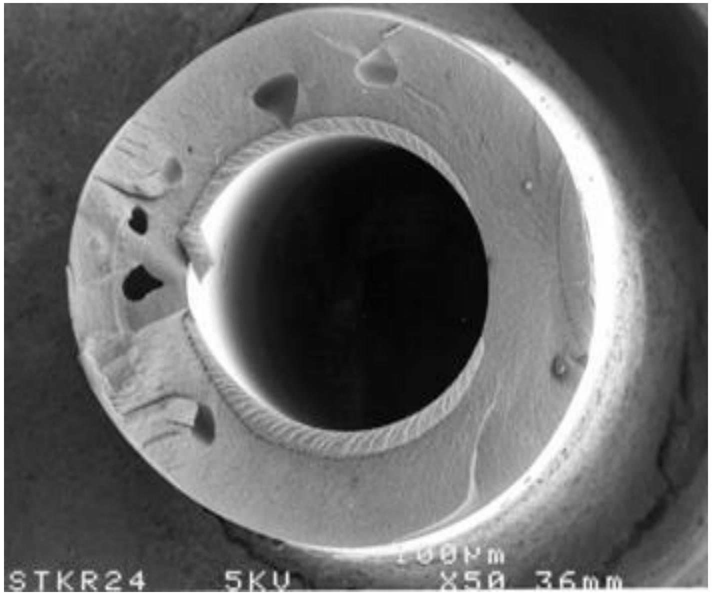


SPINNEN VAN CAPILLAIRE MEMBRANEN

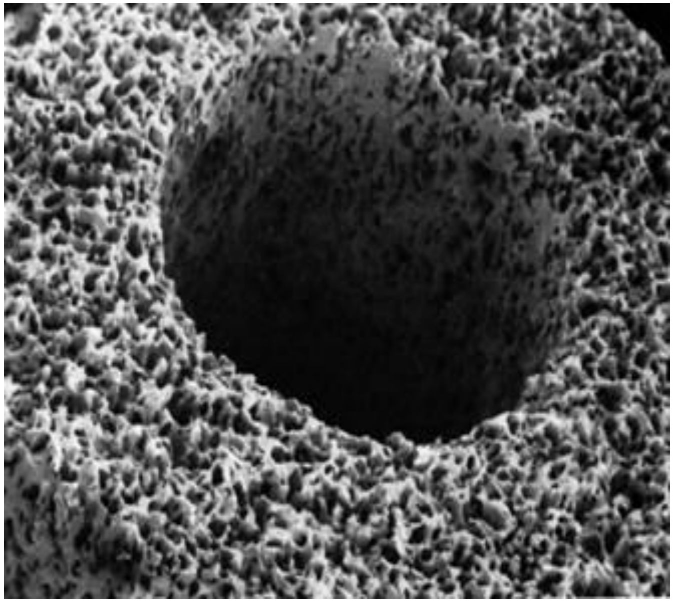


SYMMETRISCHE MEMBRAANSTRUCTUREN

Poreuze structuur, meestal MF



Polymeer holle vezel membraan (Aquasource)

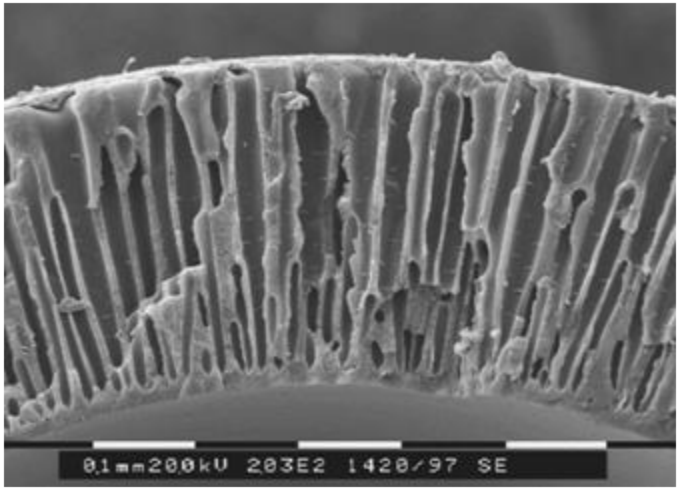


Glazen holle vezel membraan (Schott)

ASYMMETRISCHE MEMBRAANSTRUCTUREN

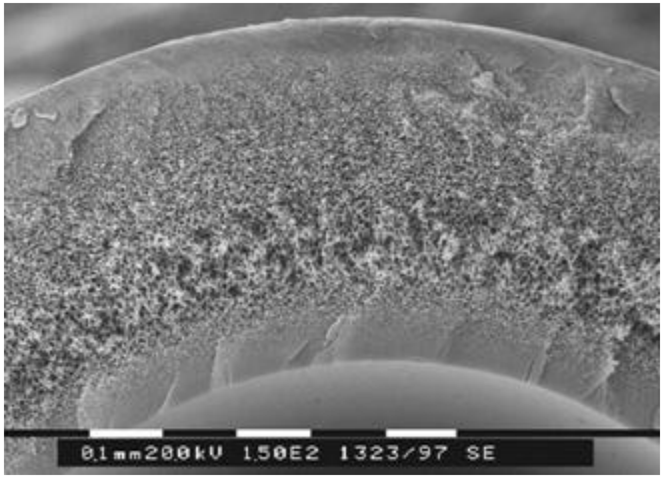
alle dichtere membranen (UF, NF, RO)

ASYMMETRISCH, vingerstructuur



Polymeer UF membraan (Koch)

ASYMMETRISCH, sponsstructuur



Polymeer UF membraan (X-Flow)

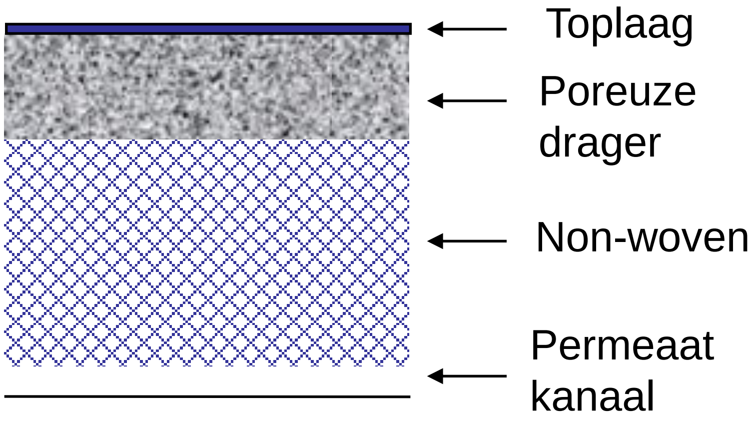
➔ Combinatie hoge flux en selectiviteit

HOE MAAK JE EEN MEMBRAAN?

4. Coating techniek

- ✓ Drager = UF membraan
- ✓ Aanbrengen van dunne, selectieve toplaag
- ✓ Procedure: dip-coating, plasma polymerisatie, interfaciale polymerisatie (2 verschillende monomeren reagen aan een interfase), spin coating…
- ✓ Bruikbaar als NF/RO membraan

➔ *Thin Film Composite (TFC) membranen*



TFC membraan

MEMBRAANMATERIALEN

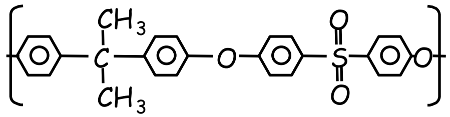
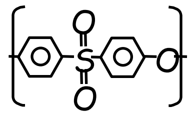
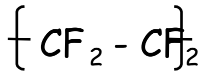
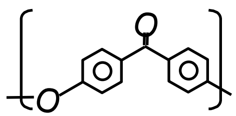
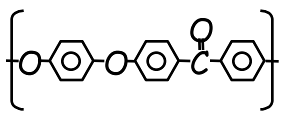
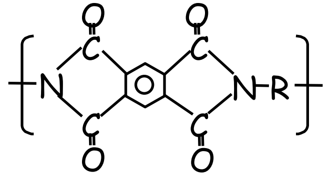
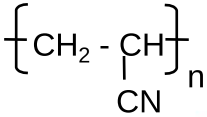
- **MF**
  - Hydrofobe polymeren: PVDF, PP, PTFE
  - Synthese via stretching of fase-inversie
  - Goede chemische stabiliteit
  - Gevoelig aan fouling

- **UF**
  - ‘Hydrofiel’: cellulose ester, gemodificeerd PSf/PES, PI, PAN, PEEK
  - Synthese via fase-inversie

- **NF/RO**
  - ‘Klassiek’ asymmetrische CA of TFC membranen (PA toplaag op PSf drager)
  - NF: polybenzimidazolen, polyamidehydrazide, polyimiden
  - Toplaag evt. geladen: electrostatische repulsie

→ ***Polymeerselectie:*** *Afweging tussen stabiliteit en verwerkbaarheid*

POLYMEREN VOOR MF/UF

Polymeer		Verwerk-baarheid	Chemische stabiliteit	Warmte-bestendigheid
Polysulfon (UDEL)		Goed	Middelmatig	Middelmatig
Polyethersulfon (VICTREX)		Goed	Middelmatig	Middelmatig
Polytetrafluoroethyleen (Teflon)		Slecht	Uitstekend	Uitstekend
Polyetherketon		Slecht	Uitstekend	Uitstekend
Polyetheretherketon		Slecht	Uitstekend	Uitstekend
Polyimide		Goed	Uitstekend	Uitstekend
Polyacrylonitril		Goed	Middelmatig	Middelmatig

vision on technology

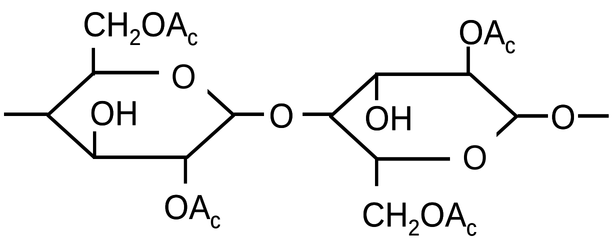
POLYMEERMODIFICATIE

DOEL: verhoging flux en vermindering fouling van hydrofobe membranen

- ✓ Inbouw hydrofiele groepen in polymeer vóór verwerking
  - e.g. sulfonering van PSf
- ✓ Toevoeging tweede momomeer vóór verwerking
  - e.g. PAN + methylmethacrylaat
- ✓ Blending: toevoeging tweede polymeer voor gieten
  - e.g. PES/PVP
- ✓ Oppervlaktemodificatie
  - e.g. coating PVDF met vinylacetaat-vinylalcohol copolymeer, nitrering van PA en PSf

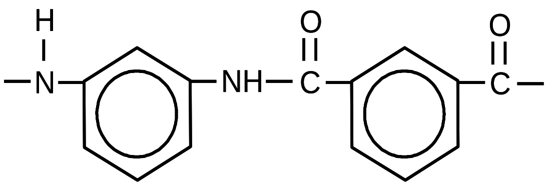
POLYMEREN VOOR NF/RO

Cellulose acetate (CA)



- 'Integrally skinned' asymmetrische membranen
- Oppervlak niet geladen: minder fouling
- Glad oppervlak: minder fouling
- Matige pH and T stabiliteit
- Gevoelig aan biodegradatie
- Matig bestand tegen chloor

Polyamide (PA)



- TFC membranen: PA/PSf
- Variabele oppervlaktelading
- Hogere flux, minder energie vereist
- Hogere pH and temperatuurstabiliteit
- Gevoeliger aan biofouling
- Zeer gevoelig aan vrije chloor!

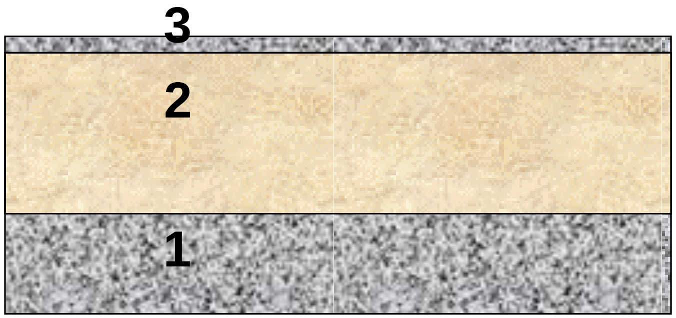
NIET-POLYMERISCHE MEMBRANEN

Keramische membranen: gelaagde structuur

✓**Drager**
- Poriën > 50nm
- Al_2O_3

✓**Mesoporeuze tussenlaag**
- 2 nm < poriën < 50 nm
- γ- Al_2O_3

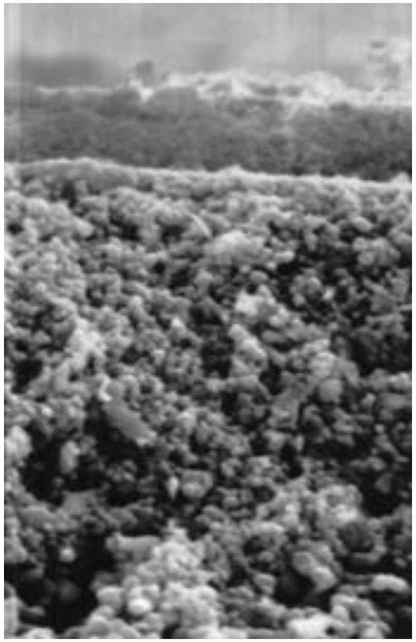
✓**Toplaag**
- Microporeus (2 nm): gepilaarde kleien, SiO_2
- Dicht: protongeleiders ($CaZrO_3$), O2-geleiders ($LaSrO_3$)



Voordelen: hoge stabiliteit (chemisch, thermisch, mechanisch)
Nadeel: hoge kost, brosheid

KERAMISCHE MEMBRAANSTRUCTUREN

Asymmetrische meerlagenstructuur



Keramische UF/NF membranen

TOEPASSINGSGEBIED MEMBRAANMATERIALEN

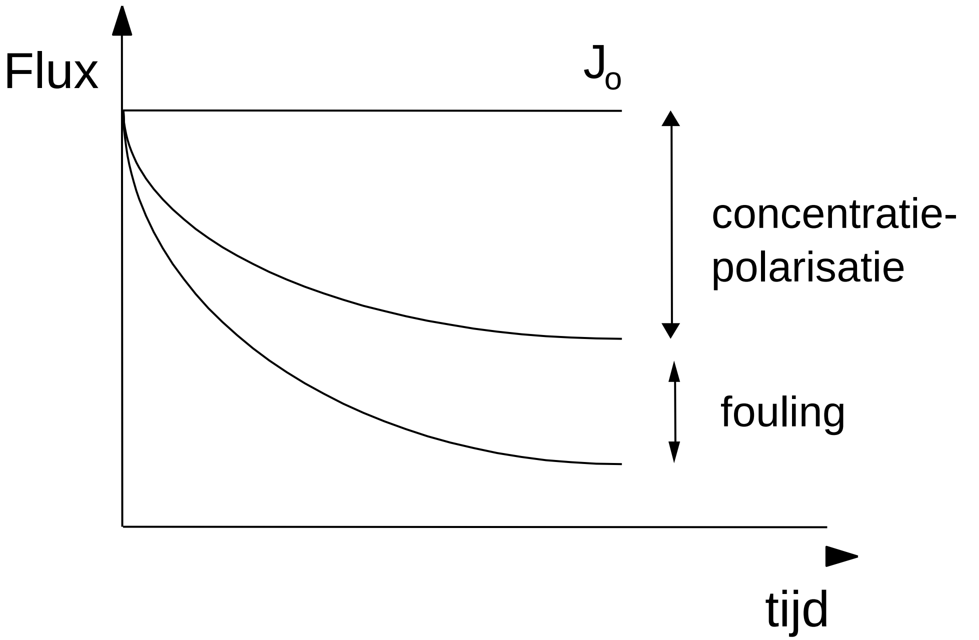
Membraanmateriaal (Scheidende laag)	MF	UF	NF	GS
Al_2O_3	X	X	X	
ZrO_2	X	X	X	
SiC	X			
Koolstof	X	X		X
TiO_2	X	X	X	
SiO_2				X
Zeolieten				X
Micro-, mesoporeus glas		X		X
Pd-legering op keramische drager				X
Pt/Pd op Al_2O_3				X
Verschillende metaalsoorten	X			

MEMBRAANSELECTIE

✓ **Materiaalkeuze**
- Voeding specificaties (pH, T, samenstelling)
- Hydrofiel/hydrofoob
- Reinigingsmethode
- Kostprijs
- Lading

✓ **Membraaneigenschappen**
- Flux
- Retentie eigenschappen
- Vervuiling

✓ **Moduleconfiguratie**



MEMBRAANKARAKTERISERING

- **Doel:**
  Relatie tussen structurele membraaneigenschappen en scheidingsgedrag

- **Vraag:**
  Welke informatie is nodig om de prestaties van een membraan in een bepaalde toepassing te voorspellen?

Intrinsieke membraaneigenschappen ≠ Actuele membraaneigenschappen

→ B.v. reële flux UF < 10 % van zuiverwaterflux

Oorzaak: Concentratie-polarisatie en fouling

PORIËNBEREIK

- ✓ Membranen reiken van poreus tot niet-poreus, afhankelijk van het scheidingsproces

  ➔ verschillende karakterisatietechnieken nodig

- ✓ Drie types membranen:
  - *Poreus* (MF, UF): poriën worden gekarakteriseerd (zeefwerking)
  - *Niet-poreus* (RO, PV, GS): materiaal bepaalt performantie (affiniteit solvent/opgeloste stof voor membraan)
  - *Geladen* (ED, NF): extra scheidingsparameter (electrostatische repulsie)

POREUZE MEMBRANEN

Twee types karakteriseringstechnieken

✓ Statische karakteriseringstechnieken

- Microscopie en beeldanalyse
- Kwik porosimetrie
- Gas adsorptie/desorptie

STRUCTUUR

✓ Dynamische karakteriseringstechnieken

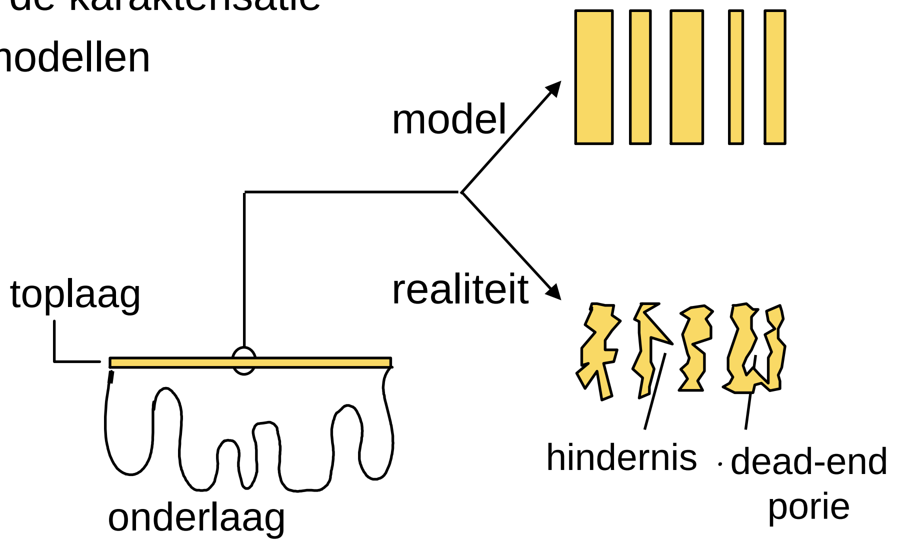
- Bubble point
- Permeabiliteit/flux metingen
- Retentie metingen (cut-off)

TRANSPORT

→ Moeilijk met mekaar in verband te brengen !

POREUZE MEMBRANEN

- ✓ Moeilijke interpretatie omwille van:
  - poriën hebben geen uniforme verdeling
  - storingsfenomenen gedurende de karakterisatie
  - gebruik van té eenvoudige modellen



→ Combinatie verschillende technieken nodig!

NIET-POREUZE MEMBRANEN

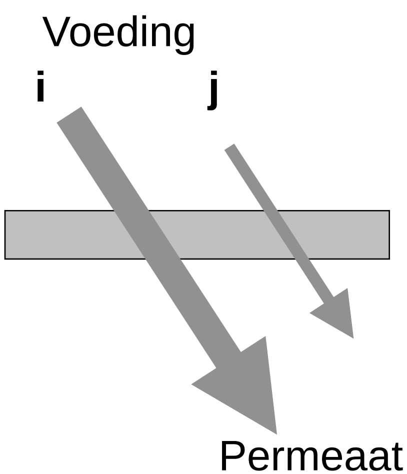
- ✓ Scheiding op moleculair niveau: oplos/diffusie mechanisme

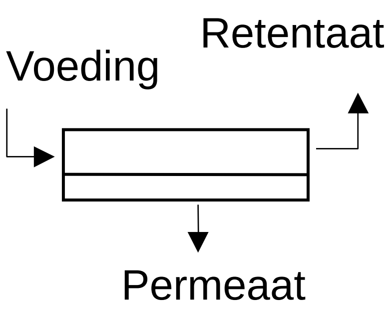
- ✓ **Belangrijke parameters:**
  - Chemische aard polymeer
  - Polymeermorfologie
  - Interactie polymeer en permeaat

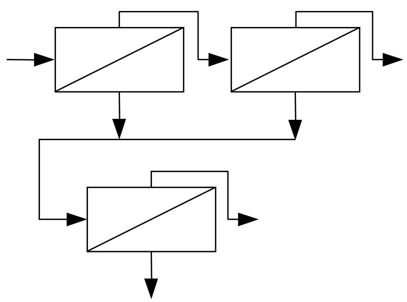
- ✓ **Karakteriseringstechnieken:**
  - Permeabiliteit (gas en vloeistof)
  - Meting fysische polymeereigenschappen (Tg, kristalliniteit, dichtheid)
  - Plasma etching (dikte toplaag)
  - Oppervlakte-analyse methodes

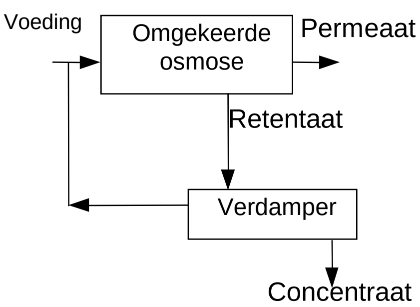
PROCESONTWERP

Membraan element	Module	Module schikking	Membraan proces







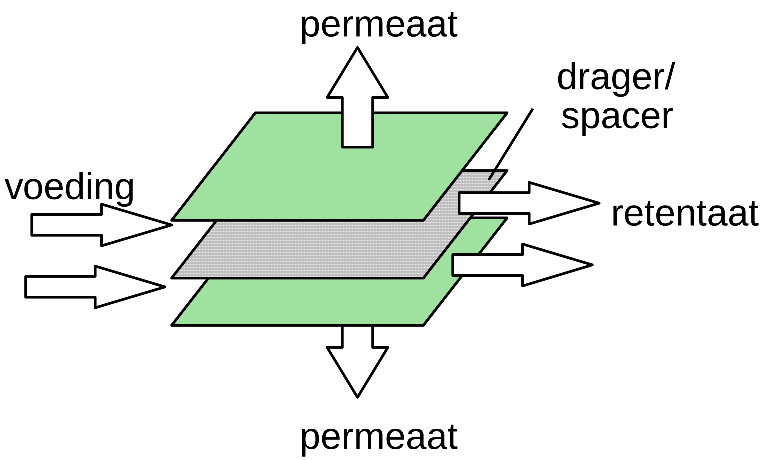


R. Rautenbach, Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung

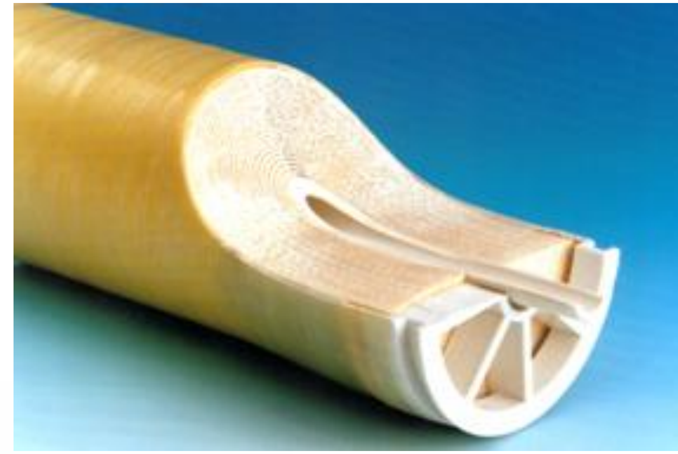
MODULE / UITVOERINGSVORM

Vlakke membranen

- ✓ Plate-and-frame module

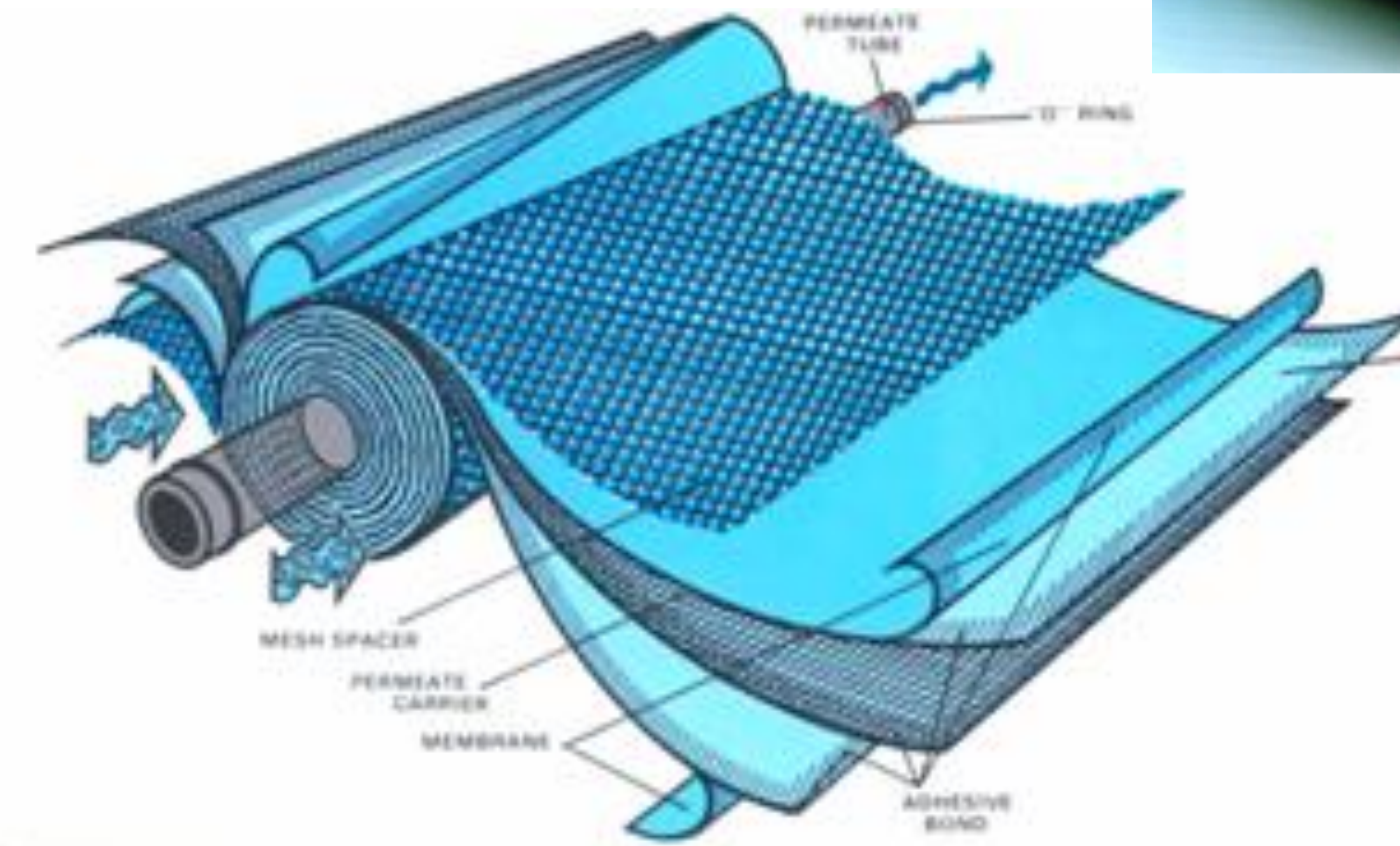


MODULE / UITVOERINGSVORM



Vlakke membranen

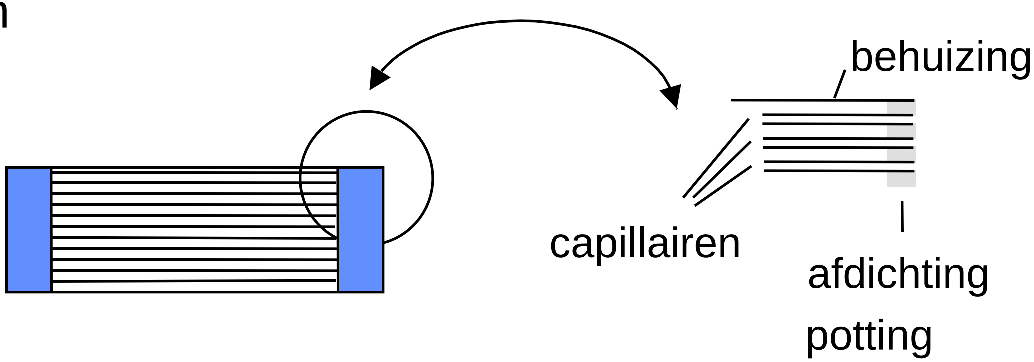
✓Spiraalgewonden module (SW)



MODULE / UITVOERINGSVORM

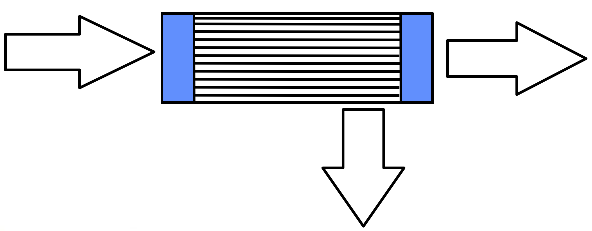
Tubulaire membranen

- ✓ Tubulaire module: d > 5 mm, + drager
- ✓ Capillaire module: d: 0.5 - 5 mm
- ✓ Holle vezel module: d < 0.5 mm

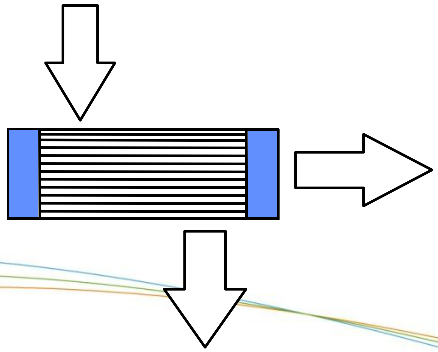


2 types

“inside out”



“outside in”



MODULES: EIGENSCHAPPEN

Eigenschap	Tubulair	Plate-and frame	Spiraal-gewonden	Capillair	Holle vezel
Pakkingsdichtheid	laag				zeer hoog
Investering	(hoog)				laag
Vervuiling	laag				zeer hoog
Reiniging	goed				slecht
Operationele kost	hoog				laag
Membraanvervanging	ja/neen	ja	neen	neen	neen

MODULES: PAKKINGSDICHTHEID

Configuratie		Opp./volume (m^2/m^3)
Tubulair	r = 5 mm	100 - 500
Capillair	r = 0.5 mm	500 - 4000
Holle vezel	r = 0.05 mm	4000 - 30000
Plate-and-frame		100 - 200
Spiraalgewonden		700 - 1000

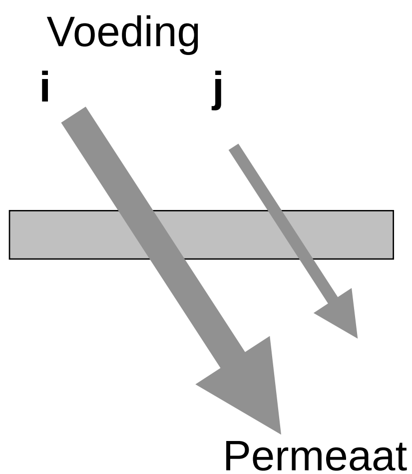
MODULES: KEUZE I.F.V. TOEPASSING

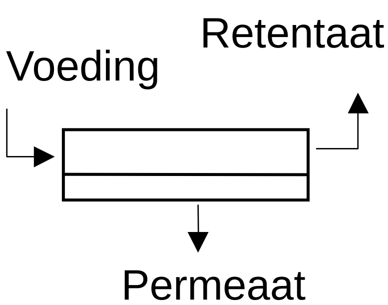
Membraanproces	Tubulair	Plate-and frame	Spiraal-gewonden	Capillair	Holle vezel
MF	++	+		+	+
UF	++	+	+	+	++
NF	++	+	++	++	+
RO	(+)	(+)	++		+
GS			++	+	++
PV		++	+	+	

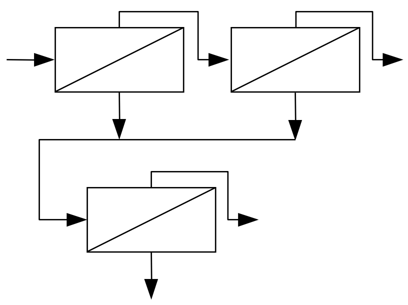
+ *mogelijke configuratie*
++ *zeer geschikte configuratie*

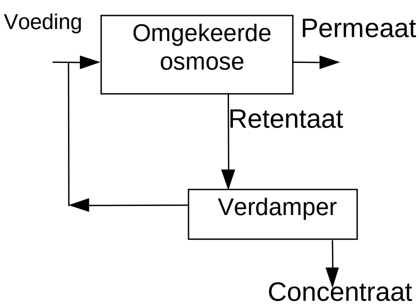
PROCESONTWERP

Membraan element	Module	Module schikking	Membraan proces





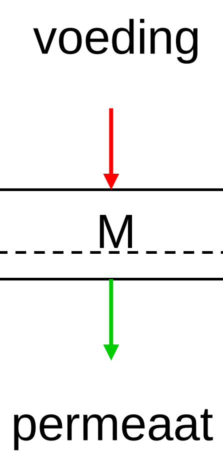




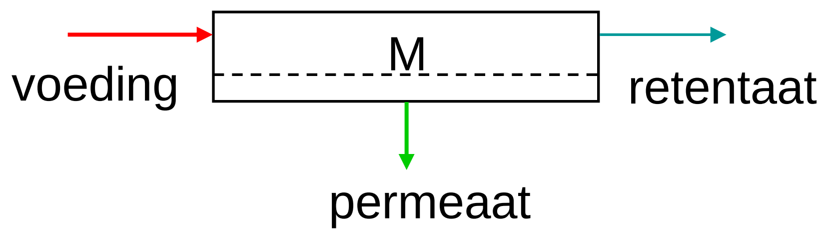
R. Rautenbach, Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung

BEDRIJFSVOERING

- **Dead-end**



- **Cross-flow**

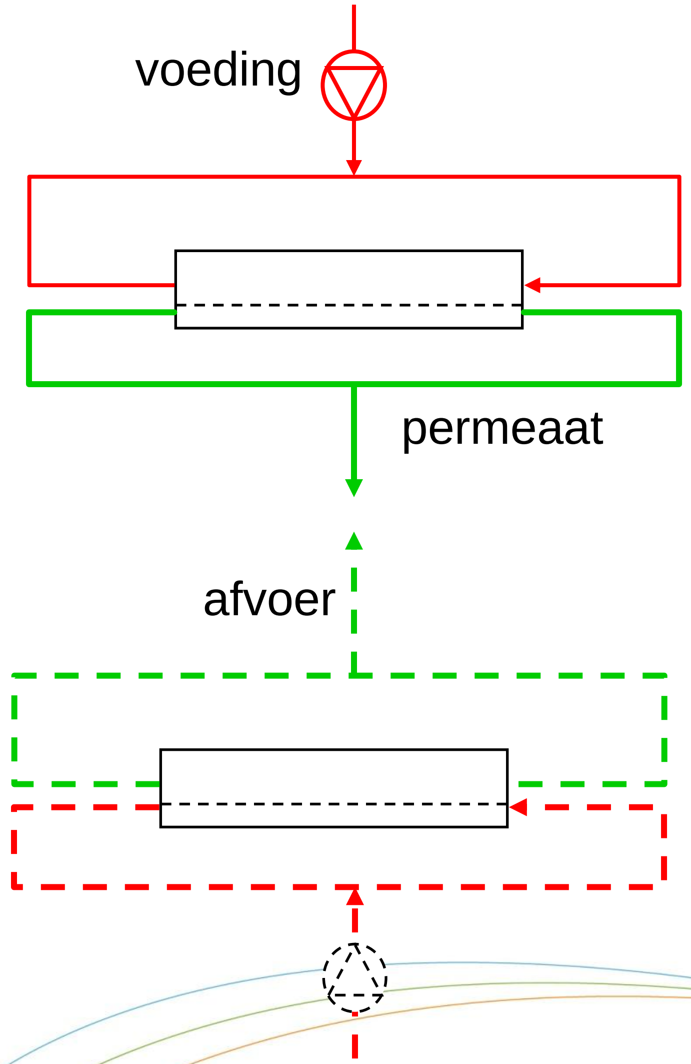


BEDRIJFSVOERING

- ✓ **Semi dead-end**

1. Filtratie

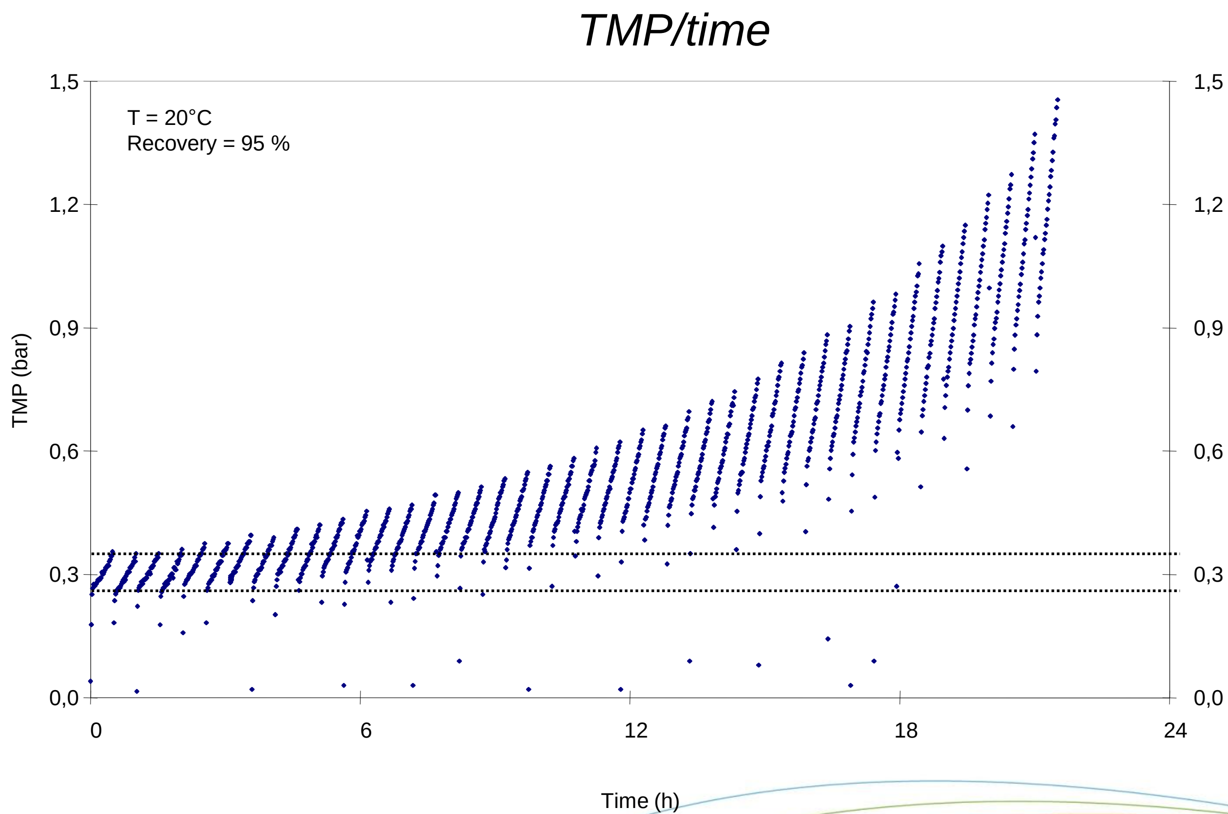
2. Terugspoeling of back-flush



PROCESSING

- Typical parameters of SDE-O

Alterning filtration and washing cycles (backflush/BF)



PROCESSING

- Calculation of net flux/recovery and waste water volume of SDE-O

Example of alterning filtration- and washing cycles for installation with 1200 m²

	Flux (l/hm²)	Duration (min)	Volume (l)
Filtration	80	30	48.000
Washing	250	0.75	3.750
		30.75	44.250
		Cycle time	Net perm. production

→ Net flux:

$$\frac{44.250 * 60}{1200 * 30.75} = \underline{72}\ l/hm^2$$

→ Water recovery:

$$\frac{44.250 * 100}{48.000} = \underline{92.2}\ \%$$

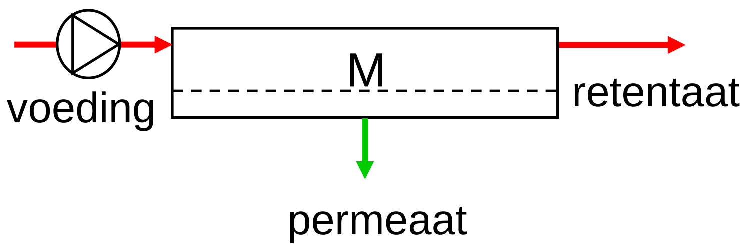
→ Volume of waste water:

3.750 l = <u>7.8</u> %

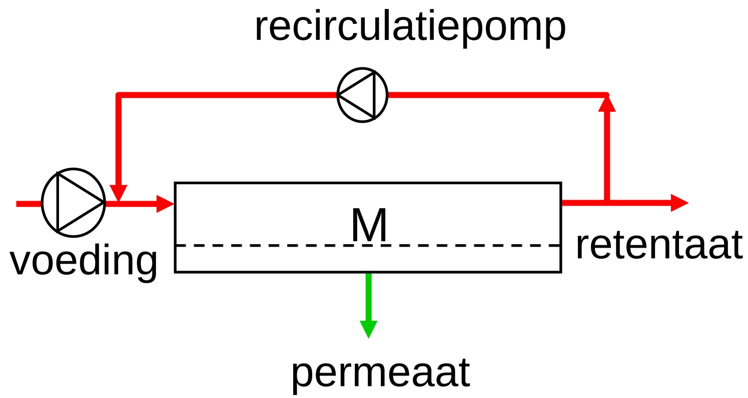
vito
vision on technology

BEDRIJFSVOERING

- ✓ **Enkele doorstroming** (“single pass”)

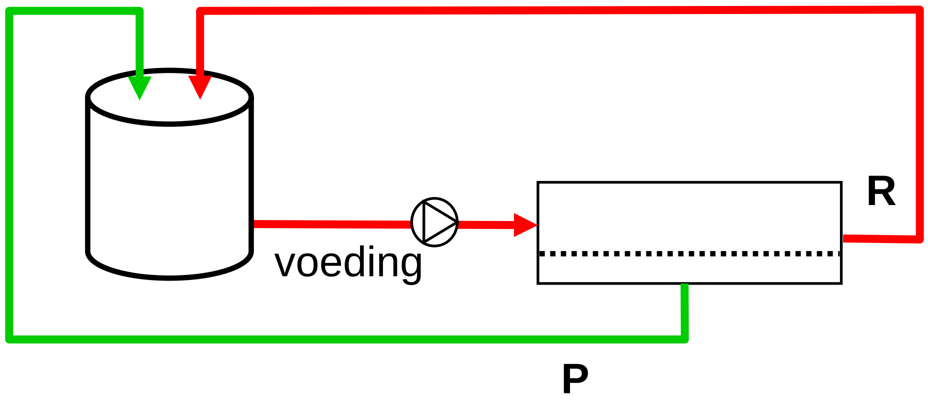


- ✓ **Recirculatie**

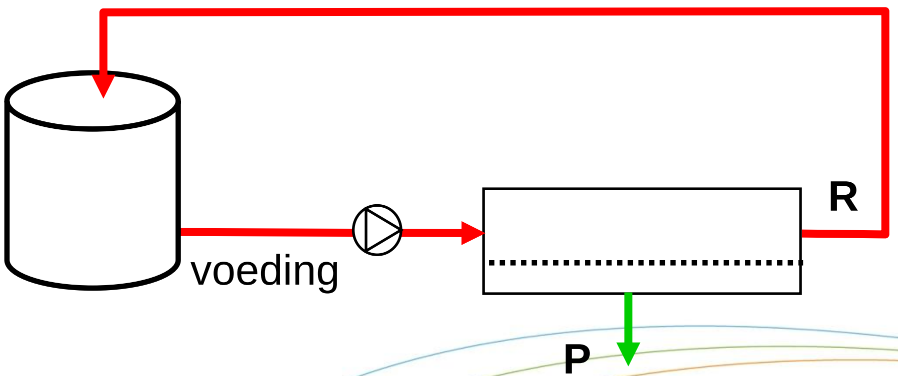


BEDRIJFSVOERING

- ✓ **Volledige recycling**

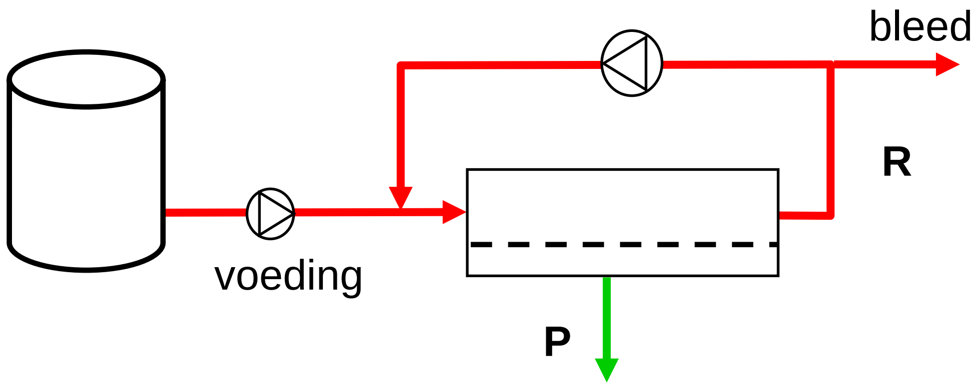


- ✓ **Batch concentratie**

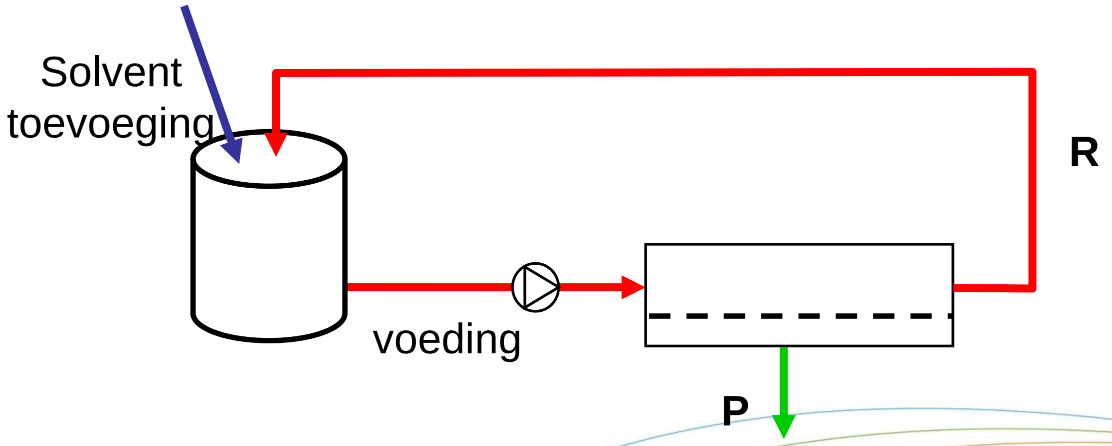


BEDRIJFSVOERING

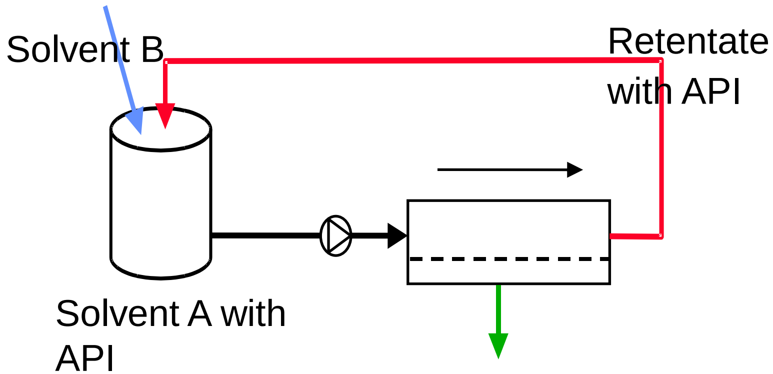
- **Feed and bleed**



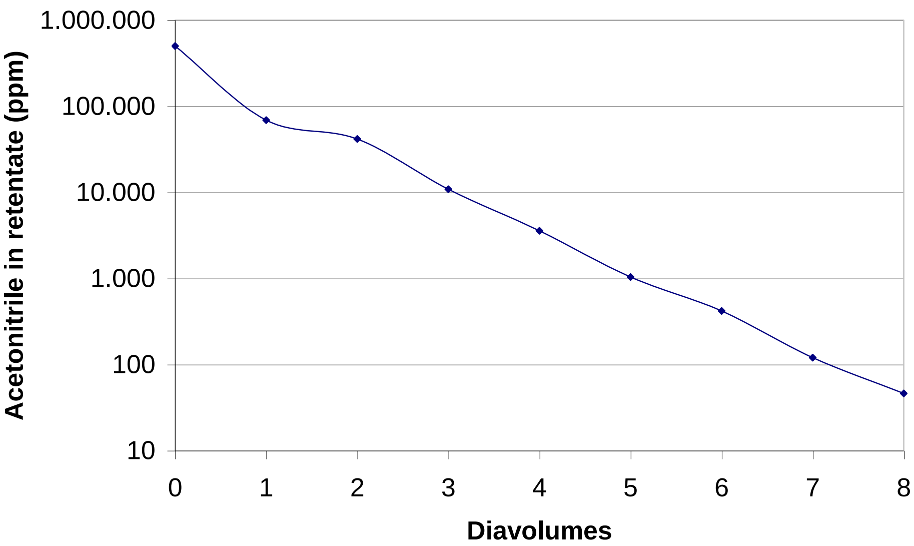
- **Diafiltratie**



Classical example
removal of acetonitrile by diafiltration

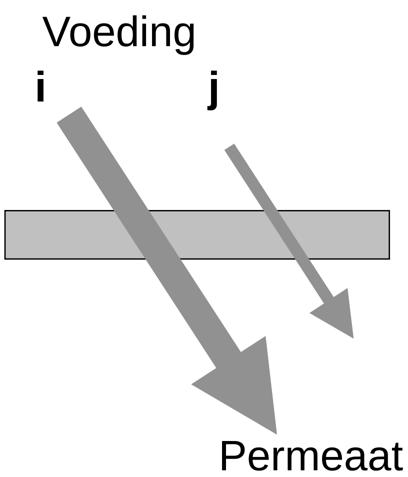
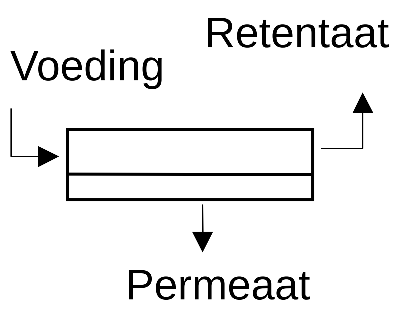
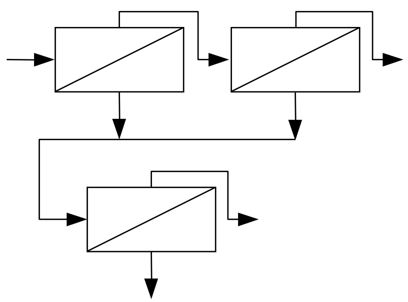
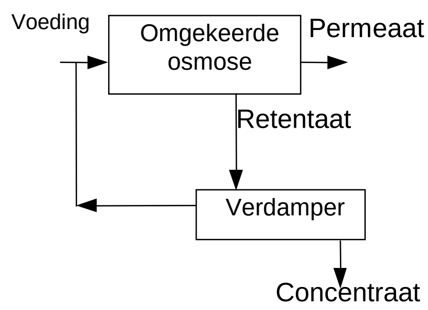


Diafiltration: principle



Evolution of acetonitrile concentration in the retentate

PROCESONTWERP

Membraan element	Module	Module schikking	Membraan proces
			

R. Rautenbach, Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung

ONTWERP INSTALLATIE

- ✓ **Targets:** debiet en/of permeaatkwaliteit
- ✓ **Membraankeuze:**
  - Scheidingskarakteristieken
  - Kostprijs: 15-40% van installatiekosten
  - Interactie membraanmateriaal - voeding
  - Stabiliteit: T, chemisch, pH ➔ reinigingsmogelijkheden

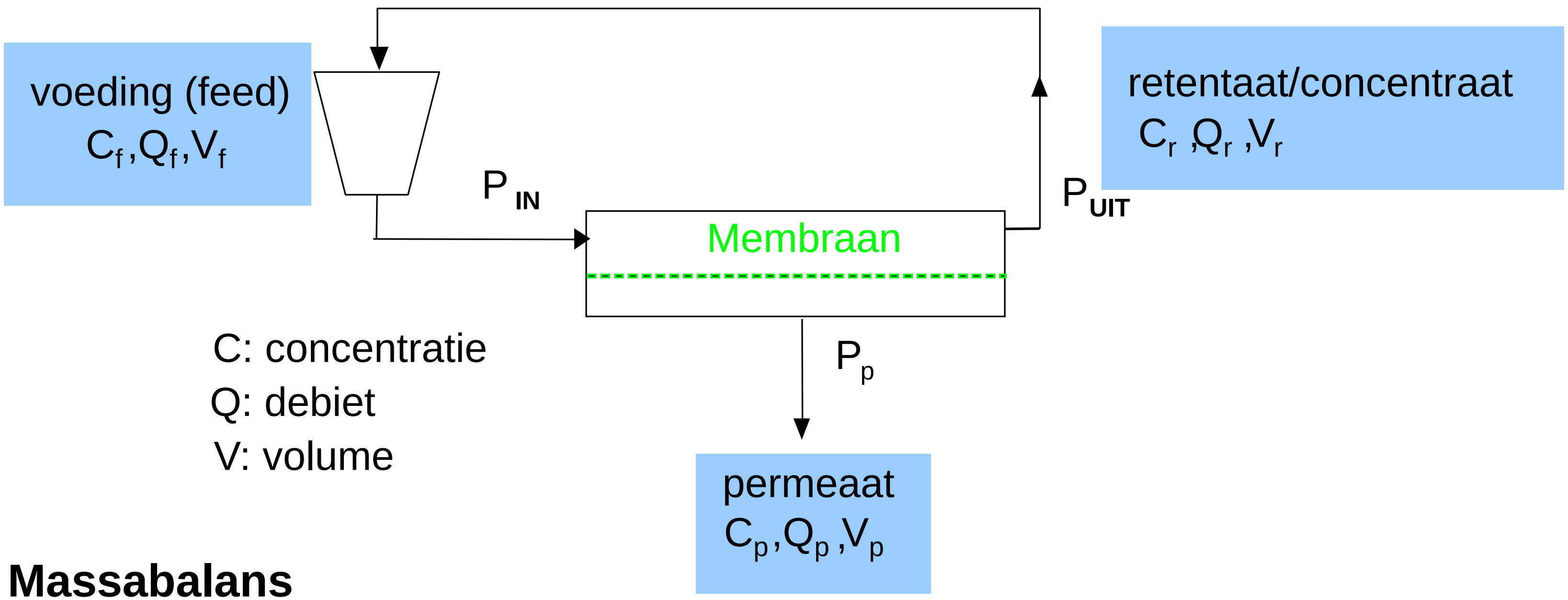
    ➔ berekening benodigd membraanoppervlak
- ✓ **Configureren van de installatie:**
  - Eén- of meertraps, serie of parallel, recirculatie...
  - Rekening houden met specificaties van membraanmodules

OUTLINE

1. Inleiding
2. Membranen / Modules en ontwerp
3. Procesparameters en fouling
4. Overzicht waterige membraantoepassingen
5. Case-studies membranen voor waterzuiveringstoepassingen
6. Overzicht en case-studies niet-waterige membraantoepassingen
7. Conclusies

TERMINOLOGIE

- **Membraanproces**



- **Massabalans**

  - voor één component

    $Q_f \times C_f = Q_r \times C_r + Q_p \times C_p$ (massa/t)

    $V_f \times C_f = V_r \times C_r + V_p \times C_p$ (massa) ➔ ogenblikkelijke balans

  - totaal $Q_f = Q_r + Q_p$ (massa/t)

    $V_f = V_r + V_p$ (volume !) ➔ globale balans

vito
vision on technology

TERMINOLOGIE

Specifieke terminologie afhankelijk van type toepassing (2 soorten)

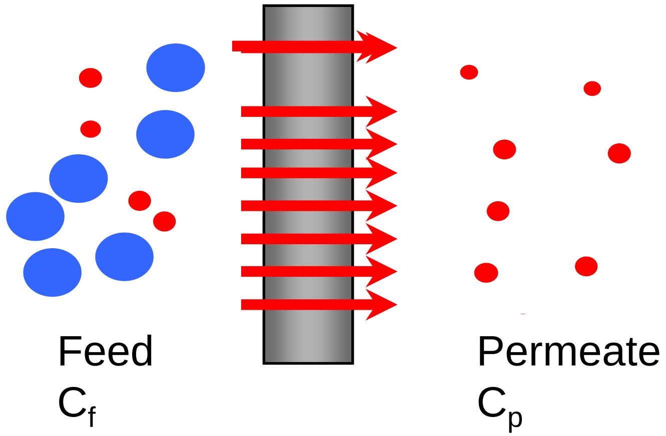
Retentaat/concentraat toepassingen

➔ opconcentrering - terugwinning of recuperatie

Permeaat toepassingen

➔ klaring/stabilisatie - zuivering - afvalwaterbehandeling

RETENTIE



Verdunde waterige oplossingen:

- ✓ **Retentie** van component i: $$R_i = \frac{C_{v,i} - C_{p,i}}{C_{v,i}}$$

  C_v = concentratie opgeloste stof in de voeding

  C_p = concentratie opgeloste stof in het permeaat

- ✓ R varieert tussen 1 (ideaal membraan) en 0, of tussen 100 en 0 %

» **Selectiviteit: scheidingsfactor**
  » α(a/b) = (Ya/Yb)/(Xa/Xb)
    » X: gewichtsfractie in feed; Y: gewichtsfractie in permeaat

TERMINOLOGIE

Retentaat/concentraattoepassingen

- ✓ Volumetrische concentratiefactor (VCF)

$$VCF = V_f \ / \ V_r \ \text{(batch)}$$

- ✓ Volume reductie (VR)

$$VR = Q_f \ / \ Q_r \ \text{(continu)}$$

- ✓ Yield (Y, opbrengst/verlies aan product)

$$Y_c = \frac{massa \ C \ in \ retentaat}{massa \ C \ in \ voeding}$$

$$Y = \frac{C_R \times V_R}{C_f \times V_f} = (VCF)^{(R-1)}$$

TERMINOLOGIE

Retentaat/concentraattoepassingen

- ✓ Concentratie in retentaat (C_r)

$$C_r = C_f\, VCF^R$$

- ✓ Gemiddelde permeaatconcentratie $(\overline{C}_p)$

$$\overline{C}_p = C_f \frac{1 - VCF^{(R-1)}}{1 - VCF^{-1}}$$

TERMINOLOGIE

Permeaattoepassingen

- Recovery (S, %)

$$S = Q_P / Q_f$$

- Concentratie in retentaat (C_r)

$$C_r = C_f (1\text{-}S)^{1\text{-}R}$$

- Gemiddelde permeaatconcentratie $(\overline{C}p)$

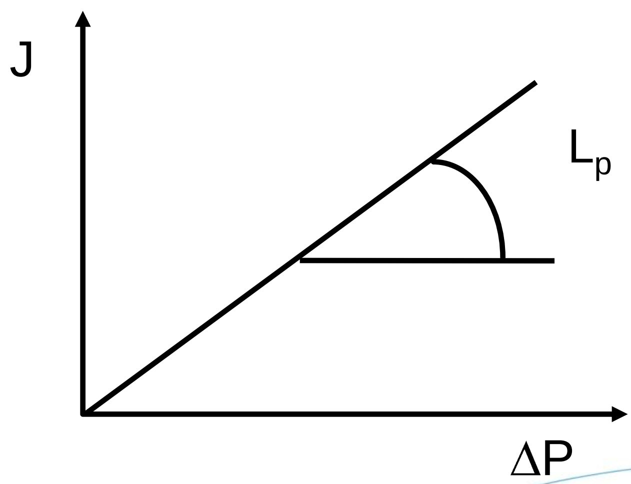
$$\overline{C}_p = \frac{C_f}{S}\left[1-(1-S)^{1-R}\right]$$

FLUX/PERMEABILITEIT

- ✓ Definitie **flux** (J, meestal in l/hm²)

$$J = \frac{(hoeveelheid)}{(oppervlakte) x (tijd)} = \frac{\text{drijvende kracht}}{\text{viscositeit.totale weerstand}}$$

- ✓ Zuiver water : lineair verband flux-druk



L_p (genormaliseerde flux of <u>permeabiliteit</u>)

SELECTIVITEIT: PRAKTIJK

- ✓ **MF:** opgegeven poriëngrootte is absoluut (100 % retentie)
  Typische waarden: 0.2 µm, 0.45 µm

- ✓ **UF en NF:** conventie: begrip cut-off waarde o.w.v. poriëndistributie

"Molecular weight cut-off" (MWCO) = molecuulgewicht dat voor 90 % door membraan wordt tegengehouden

- MWCO NF: tussen 150 -1.000 Da
- MWCO UF: tussen 1.000 -1.000.000 Da

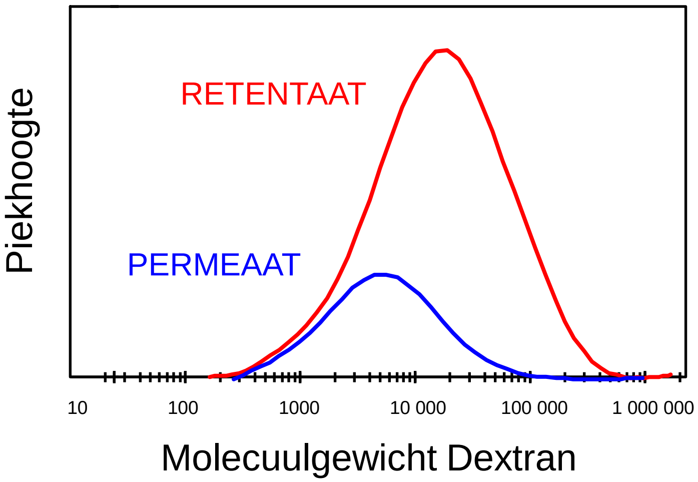
- ✓ **RO en NF:** zoutretentie voor zowel mono- als bivalente ionen opgegeven
  vb. RO: 98.5 % voor NaCl, 99.98 % voor Na_2SO_4

BEPALING MWCO

- ✓ Filtratie met mengsel van testmoleculen (Dextranen en/of PEG)
  - Instellen parameters om concentratie-polarisatie te minimaliseren
  - Staalname retentaat en permeaat

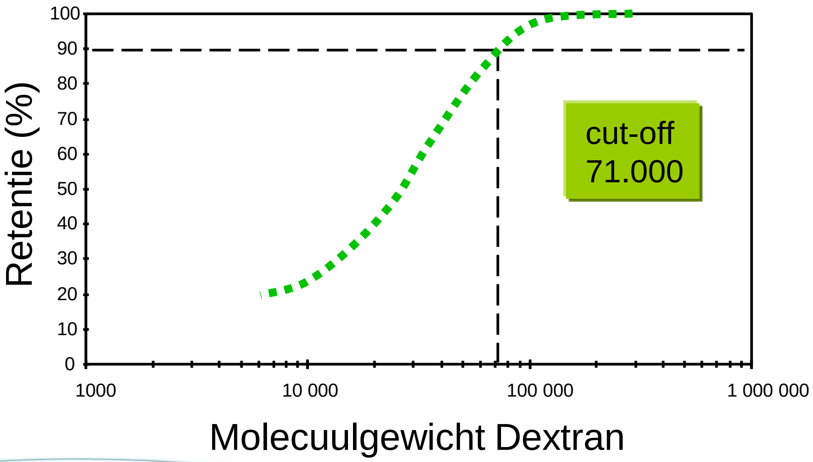
- ✓ Analyse MW verdeling stalen

GPC chromatogram



$$R_i = \left(1 - \frac{C_{pi}}{C_{vi}}\right) \times 100\%$$

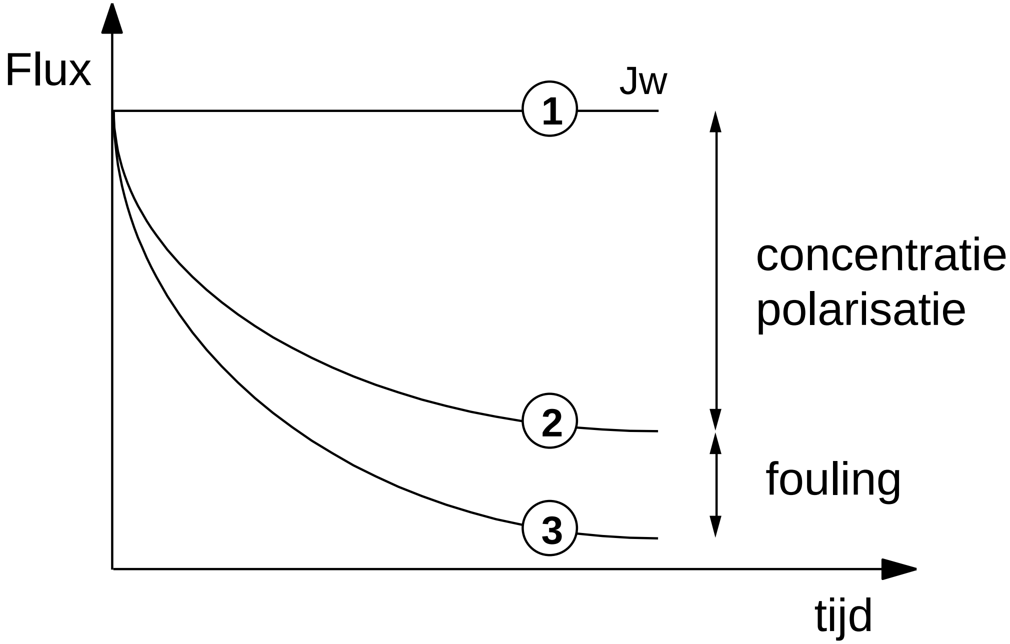
Retentiecurve:
cut-off = MW met 90% retentie



FLUXDALING

Praktijk: bij overgang van zuiver water naar proces/afval water

➔ Fluxdaling:
- UF: tot 5% van initiële waterflux
- MF: tot 1% van initiële waterflux



1 $$\text{flux} = \frac{\text{drijvende kracht}}{R_m}$$

2 $$\text{flux} = \frac{\text{drijvende kracht}}{R_m + R_{cp}}$$

3 $$\text{flux} = \frac{\text{drijvende kracht}}{R_m + R_{cp} + R_f}$$

WEERSTANDEN

✓ **Theoretisch:**

→ J i.f.v. ΔP geeft een rechte : $J = L_p \dfrac{\Delta P}{\Delta x}$

✓ **Realiteit:**

→ grensflux : $J \cong \dfrac{\Delta P}{R_{tot}}$

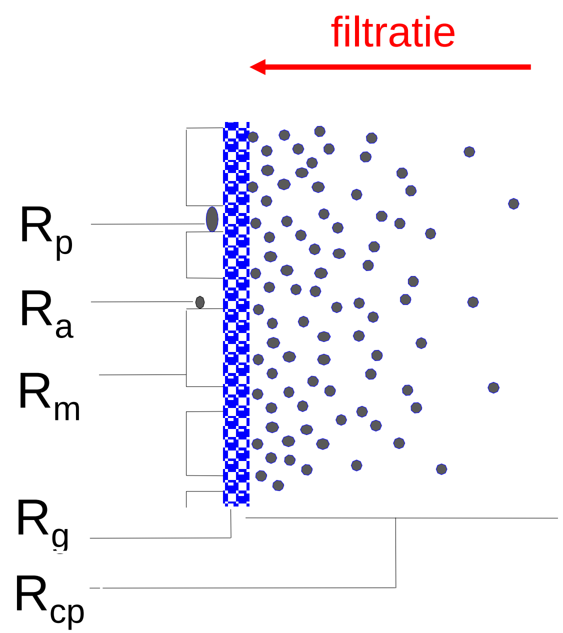
→opbouw weerstanden aan membraanoppervlak

- membraan (m)
- adsorptie (a)
- porieblokkering (p)

Fouling

- gellaagvorming (g)
- concentratiepolarisatie (cp)

Concentratie Polarisatie



OORZAKEN FLUXDALING

✓ **Concentratie-polarisatie**

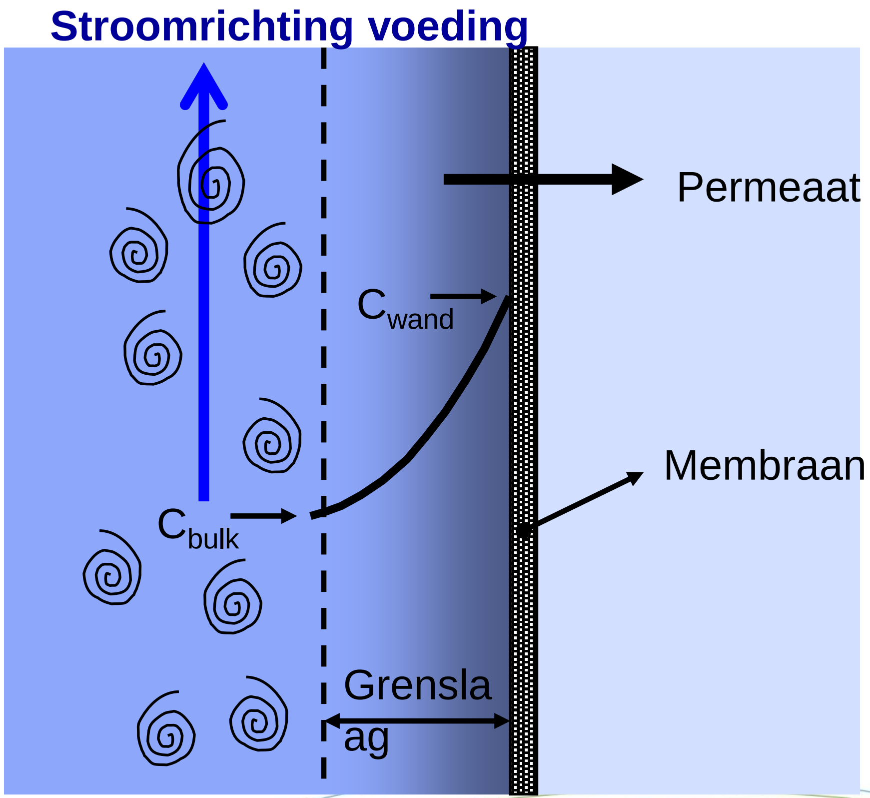
- wordt veroorzaakt door het weerhouden van de stof
- treedt snel op
- reversibel

✓ **Membraanvervuiling ("fouling")**

- wordt veroorzaakt door:
  - poriënverstopping (vnl. bij MF)
  - adsorptie op de poriënwanden
  - afzetting van de opgeloste stof op membraanoppervlak
- treedt pas op na lange duur
- irreversibel

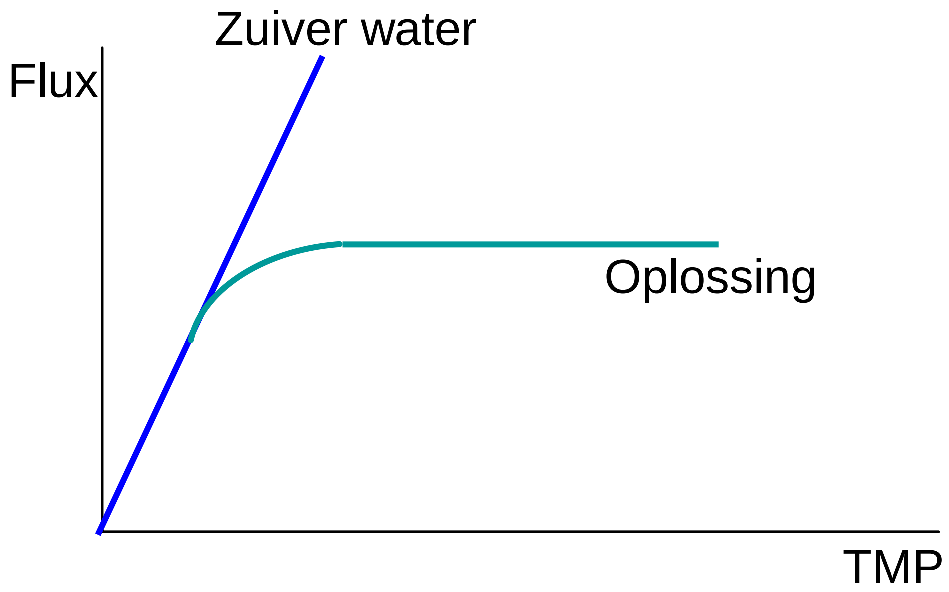
CONCENTRATIE-POLARISATIE

- ✓ wordt veroorzaakt door het weerhouden van de stof
- ✓ treedt snel op
- ✓ reversibel



CONCENTRATIE-POLARISATIE

Ontstaan van een **limietflux of plateauflux**



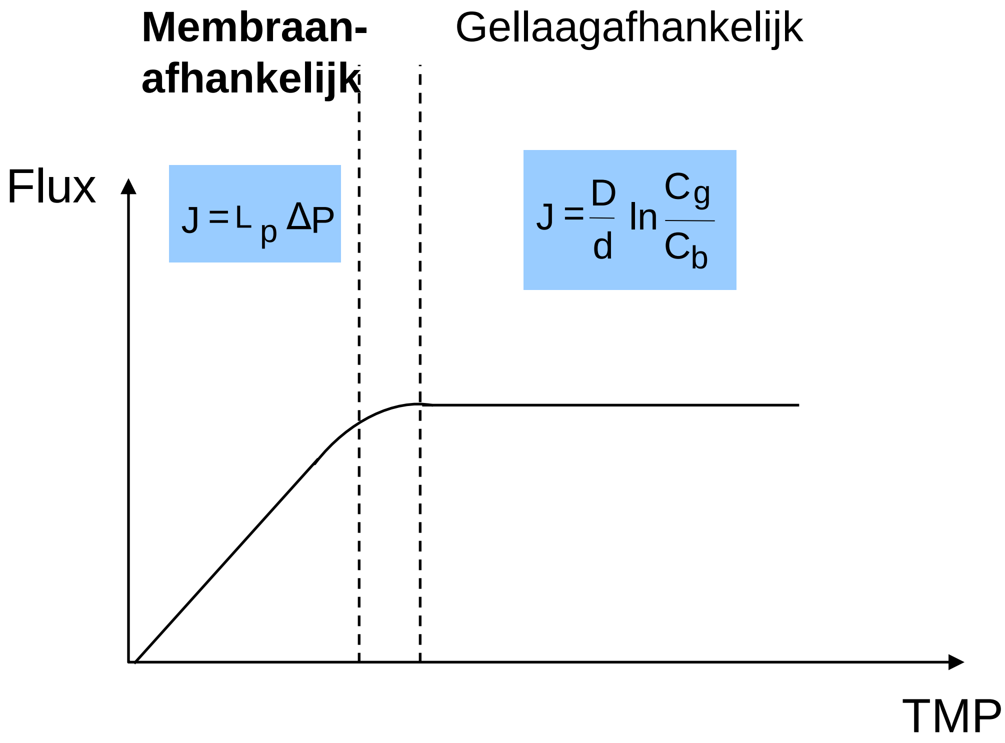
»

VOORNAAMSTE PROCESPARAMETERS

- ✓ Flux/TMP
- ✓ Bulkconcentratie (VCF/S)
- ✓ Temperatuur
- ✓ Tangentiële snelheid

FLUX/TMP

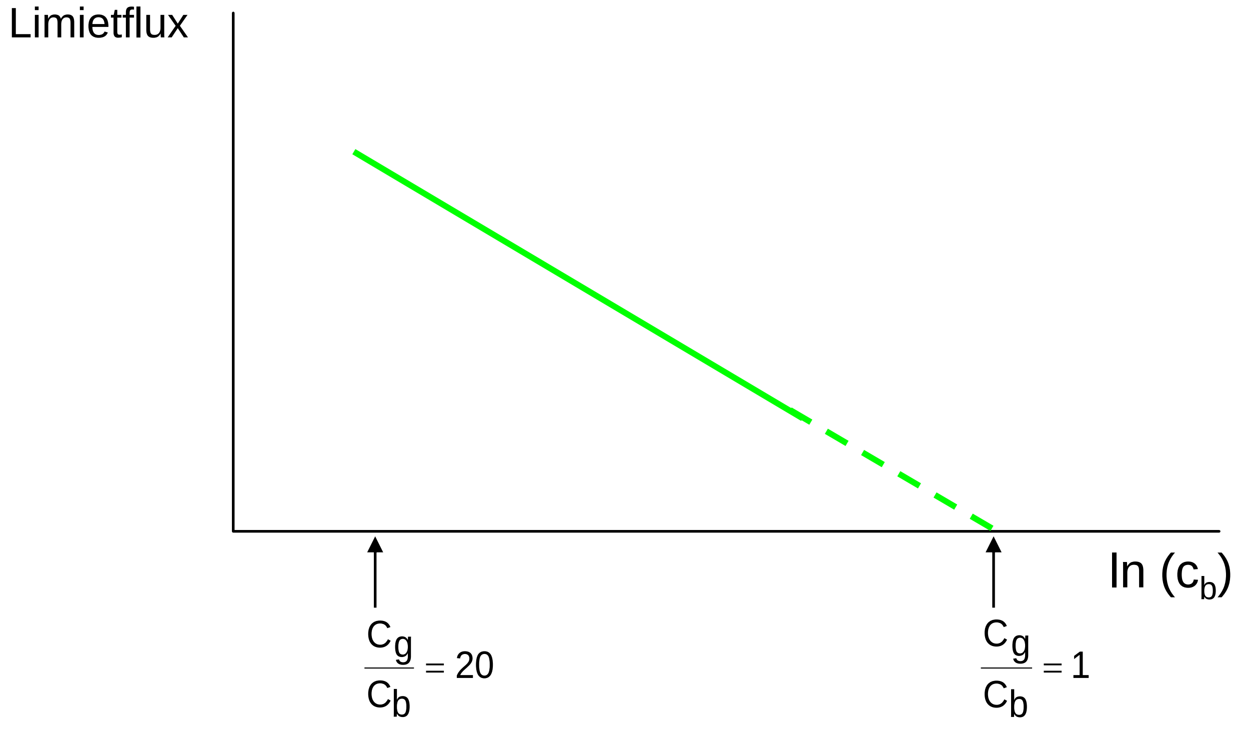
Bij cross-flow: twee verschillende gebieden



BULKCONCENTRATIE

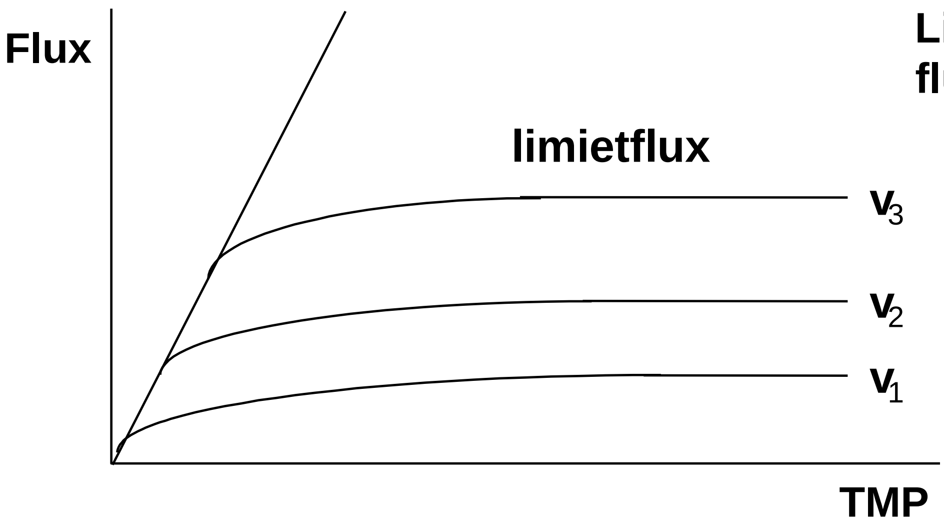
$$J = \frac{D}{d} . \ln \frac{C_g}{C_b}$$

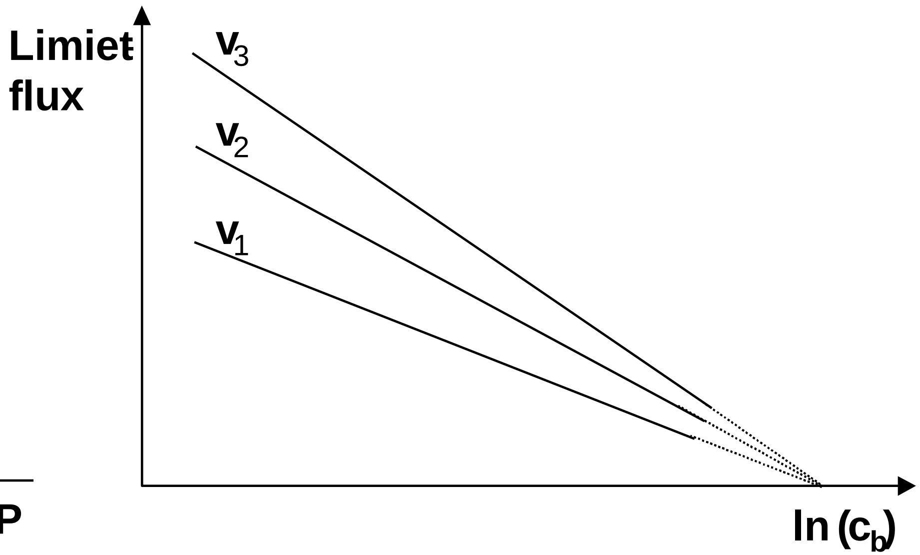
Dus: bij hogere bulkconcentratie ➔ lagere limietflux



TANGENTIËLE SNELHEID

$V_3 > V_2 > V_1$





TEMPERATUUR

Flux in functie van de temperatuur

$$\ln\frac{J_2}{J_1} = \frac{2}{3}\left[\ln\frac{T_2}{T_1} - \frac{\Delta E_0}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right]$$

Experiment : Olie/water emulsie (3 gew %)

T_1 (°C)	J_1 (l/h. m²)	Exp. $\ln J_2/J_1$	Berek. $\ln J_2/J_1$
21	240		
30	288	0.18	0.17
40	348	0.19	0.18
50	414	0.18	0.17
60	492	0.18	0.16

→ Flux neemt met ongeveer 2.5 - 2.75 % toe per 1°C-stijging

FOULING

Afzetting uit de voeding van allerhande materialen op het membraanoppervlak:

- ✓ **“deeltjes”** in dispersie (anorganische, bacteriën, virussen, algen, ...)
- ✓ **opgeloste stoffen** concentreren op in retentaat en precipiteren op membraan-oppervlak (“scaling”) indien de oplosbaarheidslimiet wordt overschreden
- ✓ **moleculen** welke aan het membraanoppervlak hechten
- ✓ **biofouling**: kolonisatie van bacteriën in biofilm

➔ **Irreversibel:** reiniging nodig!

MINIMALISATIE FOULING

- ✓ **Membraankeuze:**
  - Bepaalt in sterke mate vervuiling en reinigbaarheid
  - Minimale interactie tussen opgeloste stof en membraan

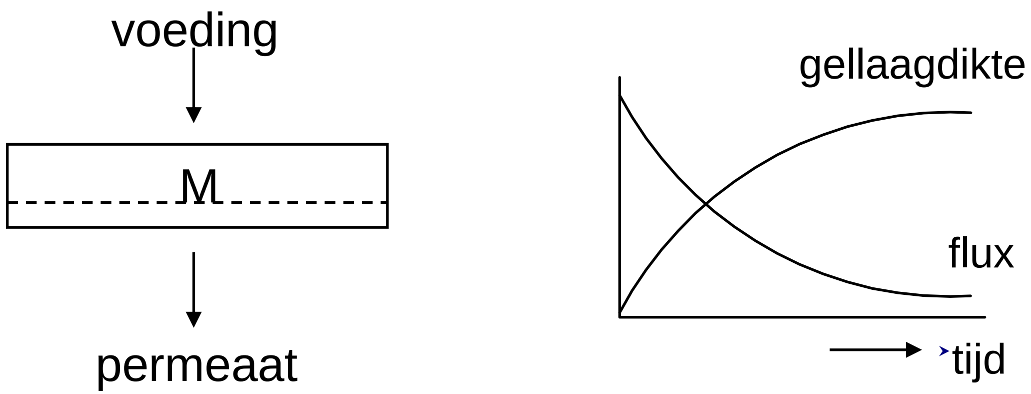
- ✓ **Voorbehandeling** voeding

- ✓ **Optimalisering bedrijfsvoering:**
  - Cross-flow i.p.v. dead-end filtratie
  - Semi dead-end filtratie
  - Backflush/backshock
  - Inductie van secundaire stromingspatronen:
    - Luchtspoeling (capillaire membranen)
    - Spacers (spiraal gewonden membranen)
  - Chemische reiniging

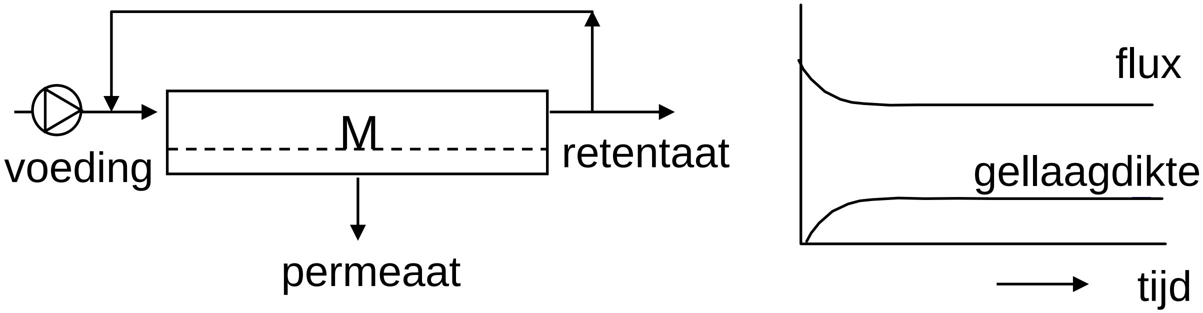
MINIMALISATIE FOULING

Bedrijfsvoering: dead-end versus cross-flow

✓ **Dead-end**



✓ **Cross-flow**

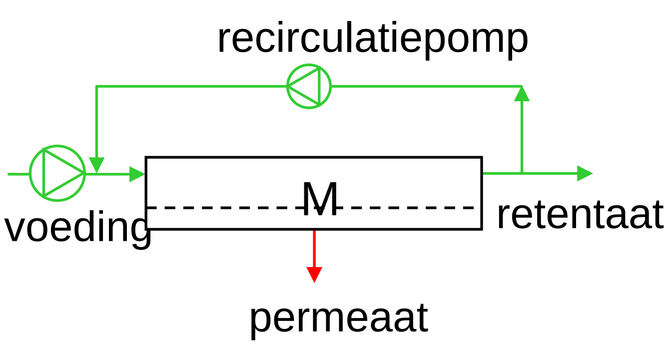


MINIMALISATIE FOULING

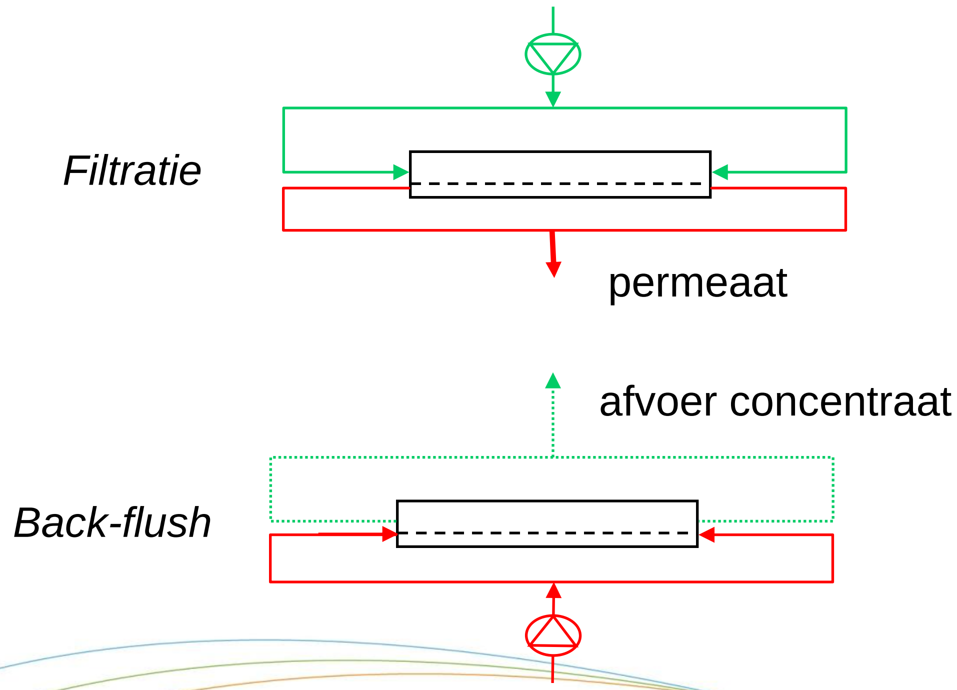
Semi dead-end bedrijfsvoering:

➔ reductie energiekost t.o.v. crossflow bedrijfsvoering voor MF/UF

Cross-flow : 4 kWh/m³

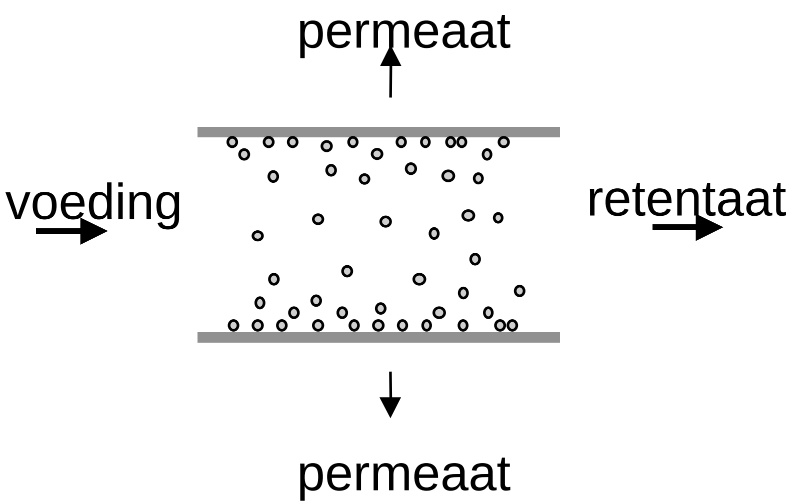


Semi dead-end: 0.1-0.3 kWh/m³

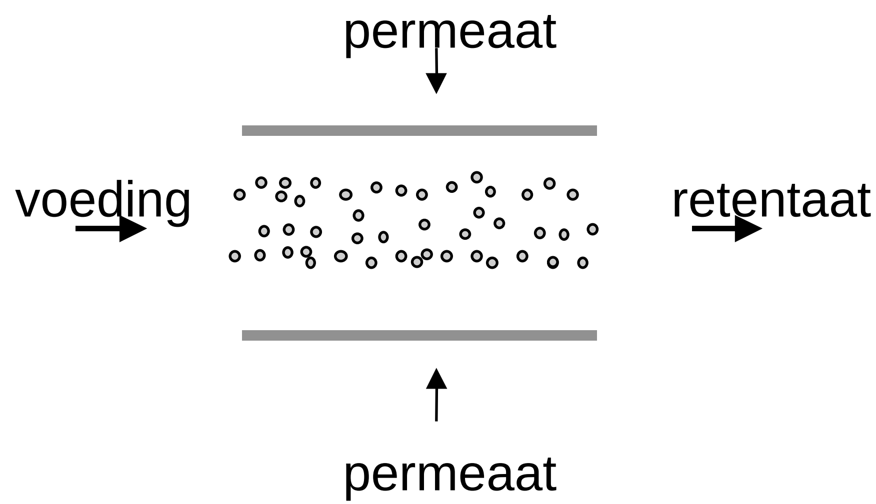


MINIMALISATIE FOULING

Back-flush / Back-shock (vnl. bij MF)



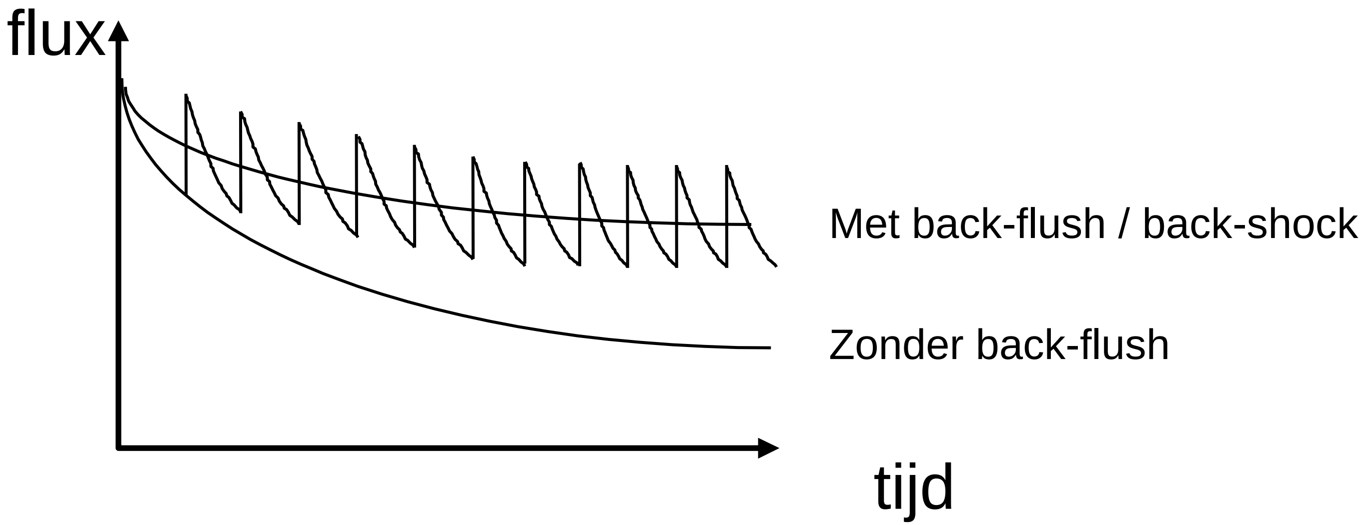
Filtratie



Back-flush / Back-shock

MINIMALISATIE FOULING

Back-flush / back-shock



	Frequentie	*% neg. flux*	*Duur*
Back-flush:	10 - 30’	30 - 10	0.5 - 5’
Back-shock:	1 - 10”	5 - 0.5	0.05 - 0.5”

MINIMALISATIE FOULING

Geschikte **voorbehandeling**: bepalend voor levensduur en performantie membraan!

- ✓ Voorfiltratie
- ✓ Chemische klaring of toevoeging van complexeermiddelen
- ✓ pH aanpassing
- ✓ Warmtebehandeling
- ✓ Gebruik van enzymes en preadsorptie op actieve kool

VOORBEHANDELING

Scaling *(anorganisch)*	**Vervuiling** *(organisch)*
Koud / warm (ontkalking) Zeoliet ontharding Aanzuring Antiscalants Fe, Ba, silica	Coagulatie Clarificatie / uitvlokking Filtratie Oxidatie Zandfiltratie Chlorering Actieve kool H_2S verwijdering Biocide additie Biofouling

PROCESSING

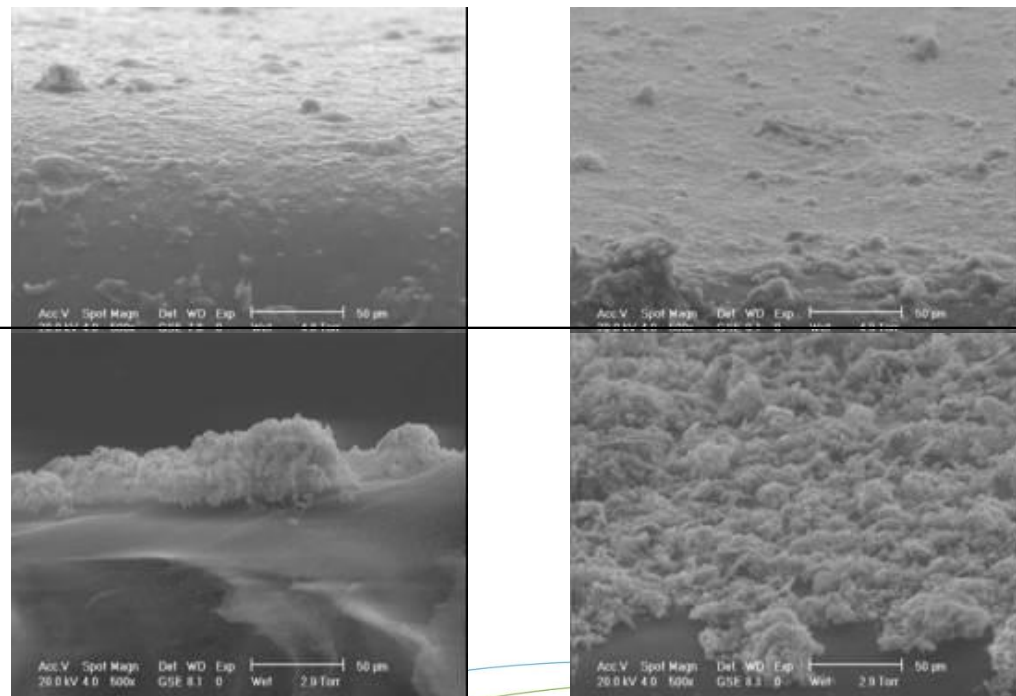
- SDE-O / IN-LINE DOSING OF FLOCCULANT

  Dosing of flocculant (e.g.: $FeCl_3$) generates $Fe(OH)_3$ containing filtration cakes. These are are much more permeable (see ESEM).

  ➔Hence filtration becomes much more stable

Without $FeCl_3$

With $FeCl_3$ (0.7 mg Fe /l)

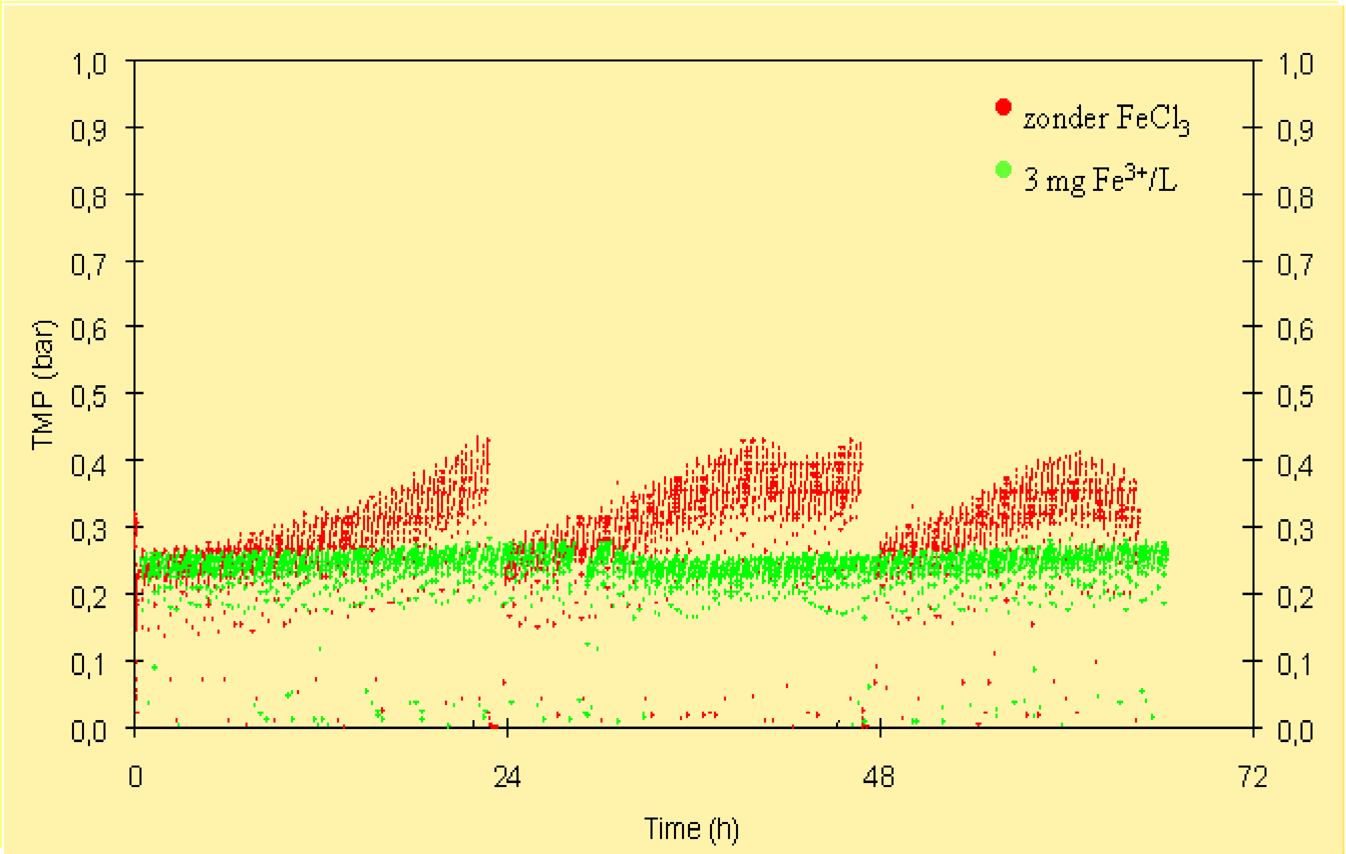


Calculated cake porosity: 37 % (without) and 93 % (with)

Data: Research project SVW/Vito, 2000

vito vision on technology

Vb. VOORBEHANDELING: effect dosering flocullant



OUTLINE

1. Inleiding
2. Membranen / Modules en ontwerp
3. Procesparameters en fouling
4. **Overzicht waterige membraantoepassingen**
5. Case-studies membranen voor waterzuiveringstoepassingen
6. Overzicht en case-studies niet-waterige membraantoepassingen
7. Conclusies

MF / UF - TOEPASSINGEN

- Concentratie
  - Eiwitten (melk), polymeren, gelatine,…
- Terugwinning of recuperatie
  - Proteïnen (kaaswei), sterkpolymeren, indigo, lignine, …
- Klaring of stabilisatie
  - Appelsap, wijn, bier, sterilisatie …
- (Afval)waterbehandeling
  - Verwijdering zwevende stof (voorzuivering RO), o/w emulsies, bleekeffluenten, ontvettingsbaden, …
- Zuivering
  - Bloedfractionering (hemofiltratie), diafiltratie, …

NF - TOEPASSINGEN

- ✓ Waterbereiding
  - Partiële ontharding
  - Verwijdering opgeloste organische componenten: pesticiden, humuszuren, …
  - Aanmaak ultrapuur water (NF + IEX)
- ✓ Sulfaatverwijdering uit zeewater
- ✓ Ontzouting van kaaswei (diafiltratie)
  - Permeatie zout, concentratie organische stoffen
- ✓ Zuivering effluenten/spoelwaters
  - Concentratie van Ni, Fe, Cu, Zn… (metaalindustrie)
  - Kleurstofverwijdering (textielindustrie)
  - Ligninesulfaat + derivaten (papierindustrie)

RO - TOEPASSINGEN

- ✓ Waterbereiding
  - Ontzouting van brak en zeewater tot drinkwater
  - Aanmaak ultrapuur water
- ✓ Concentratie van productstromen
  - Opconcentreren van melk en wei
  - Voorbehandeling evaporatie
- ✓ Afvalwaterbehandeling
  - Procesindustrie

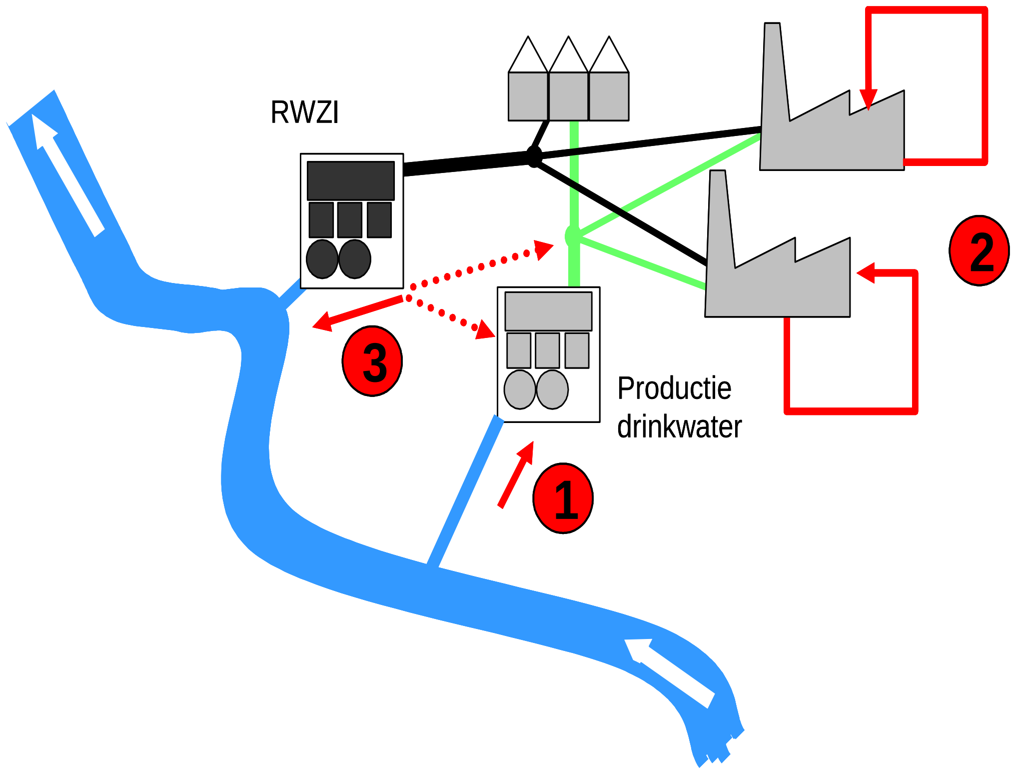
OUTLINE

TOEPASSING WATERZUIVERING

1) Productie proceswater:
   - Alternatieve waterbronnen

2) In-process toepassingen:
   - Waterzuivering
   - Product recuperatie

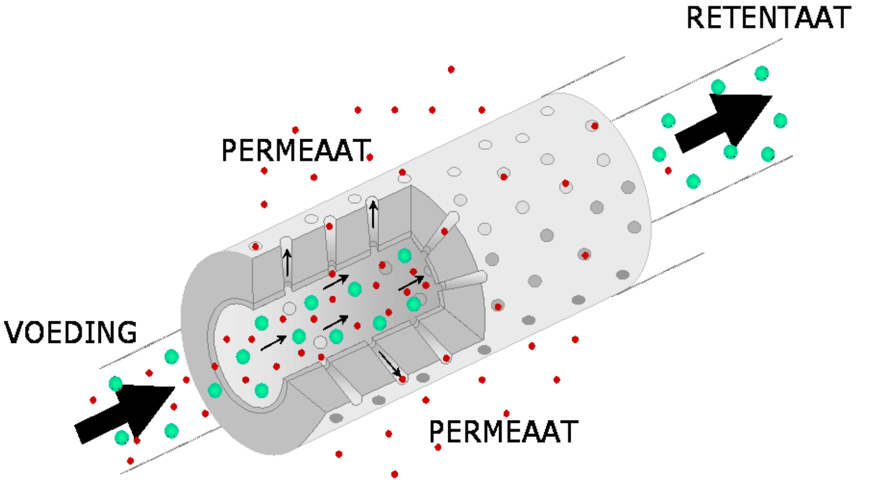
3) End-of-pipe toepassingen:
   - Zuivering tot hergebruik



MEMBRAANFILTRATIE IN WATERZUIVERING

- ✓ **Membraanfiltratie:**
  - MF / UF
  - NF
  - RO

- ✓ Implementatiemogelijkheden:
  1) Voorbehandeling + MF/UF + NF/RO
  2) Membraanbioreactoren



Concentraat !!

MEMBRAANFILTRATIE IN WATERZUIVERING

- ✓ Bereiding van drink- of proceswater: aaneenschakeling van technieken
  - Voorbehandeling: verwijdering van zwevende delen
  - Nazuivering: verwijdering opgeloste stoffen

- ✓ Klassieke technieken of membraantechnologie

Conventionele voorbehandeling	+	NF/RO
MF/UF	+	NF/RO

MEMBRAANFILTRATIE IN WATERZUIVERING

Voordelen voorbehandeling via MF/UF

- ✓ Membranen zijn absolute fysische barrière:
  - Bacteriën: log 5-6, virussen log 4-5 reductie
- ✓ 30 - 40 % ruimtebesparing en modulair
- ✓ Goedkopere nabehandeling
  - RO 20 % minder investering + lagere operationele kost
- ✓ Eenvoudige bedrijfsvoering
- ✓ Relatief ongevoelig aan wijzigingen ruw water kwaliteit, seizoensschommelingen, procescondities
- ✓ Constante permeaatkwaliteit (betrouwbaar proces)

PROCESEIGENSCHAPPEN

- **UF:**
  - Toepassing: Verwijdering SS + bacteriën
  - Eisen voedingswater: SS < 50 mg/l, voorfiltratie ± 200 µm
  - Permeaatproductie: 90-95 % van voeding

- **NF:**
  - Toepassing: verwijdering TOC en ontharding
  - Eisen voedingswater: geen SS, SDI < 5
  - Permeaatproductie: 60-90 % (twee- of drietraps)

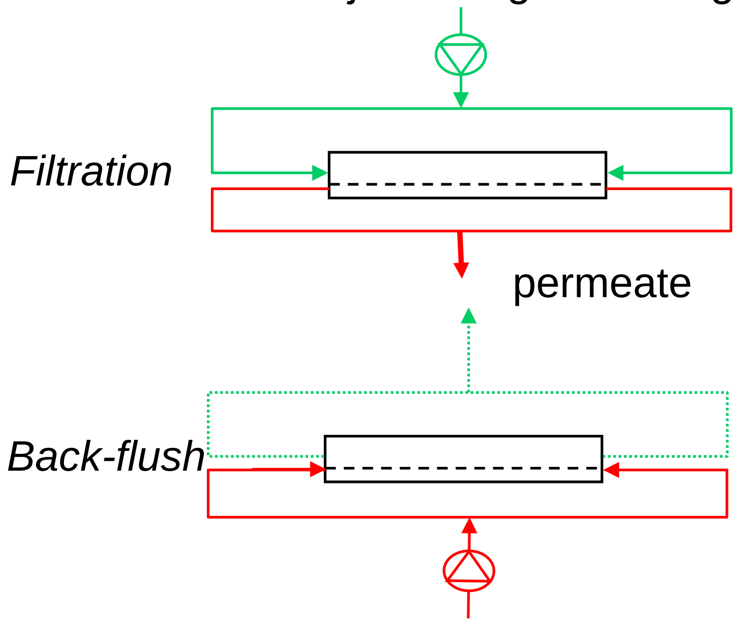
- **RO:**
  - Toepassing: ontzouting
  - Idem NF

MF/UF MEMBRANEN

2 types van bedijfsvoering:

Oppervlaktewater
Grond/bronwater

- ✓ Semi dead-end bedrijfsvoering voor de “gemakkelijke” waters



- ✓ Cross-flow bedrijfsvoering voor de “moeilijke” waters

Afvalwaters
Eutrofische waters
Rivierwater

Toepassing: Waterzuivering

- Bedrijf: IWVA (drinkwaterbedrijf)
- Target: Verminderen hoeveelheid natuurlijk grondwater
- Concept: Artificiële opvulling van freatisch watervoerende laag (infiltratie) in duinen
  - Zuivering van riool effluent, duurzame kringsluiting
  - Voorkeur voor membraantechnologie (MF+RO)
- Capaciteit: max. 4 Mm^3/y (285 m^3/u)
- Totale investeringen: 6.35 millioen euro
- Projectnaam: “Torreele”

Toepassing: Waterzuivering

Membraankeuze:

- ✓ **MF:➔** Zeeweed (Zenon)
  - kan grote variaties in voedingssamenstelling aan
  - outside-in, luchtspoeling
  - submerged

- ✓ **RO:➔** Dow Filmtec, laag energieverbruik
  - recovery (max. 75 %)
  - membraantype: laag energieverbruik?, lage foulingstendens?
  - reinigingsstrategie

Optimale flux:

- max. 40 l/hm² voor MF
- max. 20 l/hm² voor RO

Toepassing: Waterzuivering

Behandelingsprocedure:

- ✓ Pre-screening van WWTP Aquafin (1 µm) effluent
- ✓ NaOCl dosering (pre-chlorinatie)
- ✓ MF Zenon Zeeweed
- ✓ NaOCl dosering (post-chlorinatie)
- ✓ Dosering anti-scalant, zuur en bisulfiet
- ✓ MF kandelfilter (5 µm)
- ✓ RO (Dow Filmtec), 2/1 design
- ✓ UV behandeling

➔ Infiltratie: 90 % van RO permeaat en 10 % van MF permeaat

Wastewater treatment into drinking water

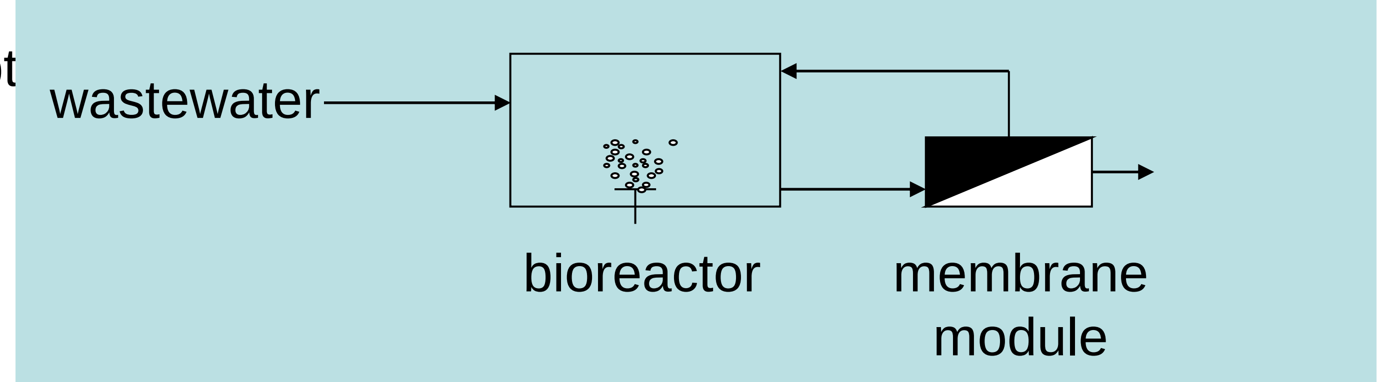
Microfiltration –
two step reverse osmosis

WWTP Wulpen (Belgium)
IWVA

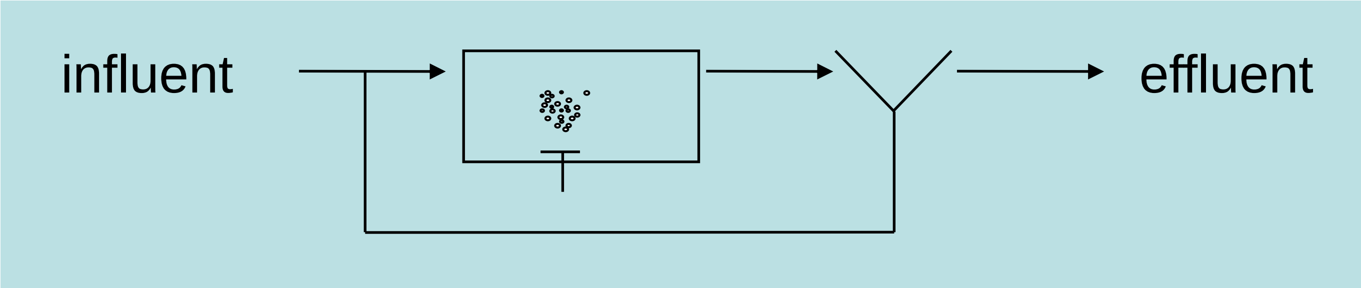
TNAV-
Flanders

Waste water: CAS vs MBR

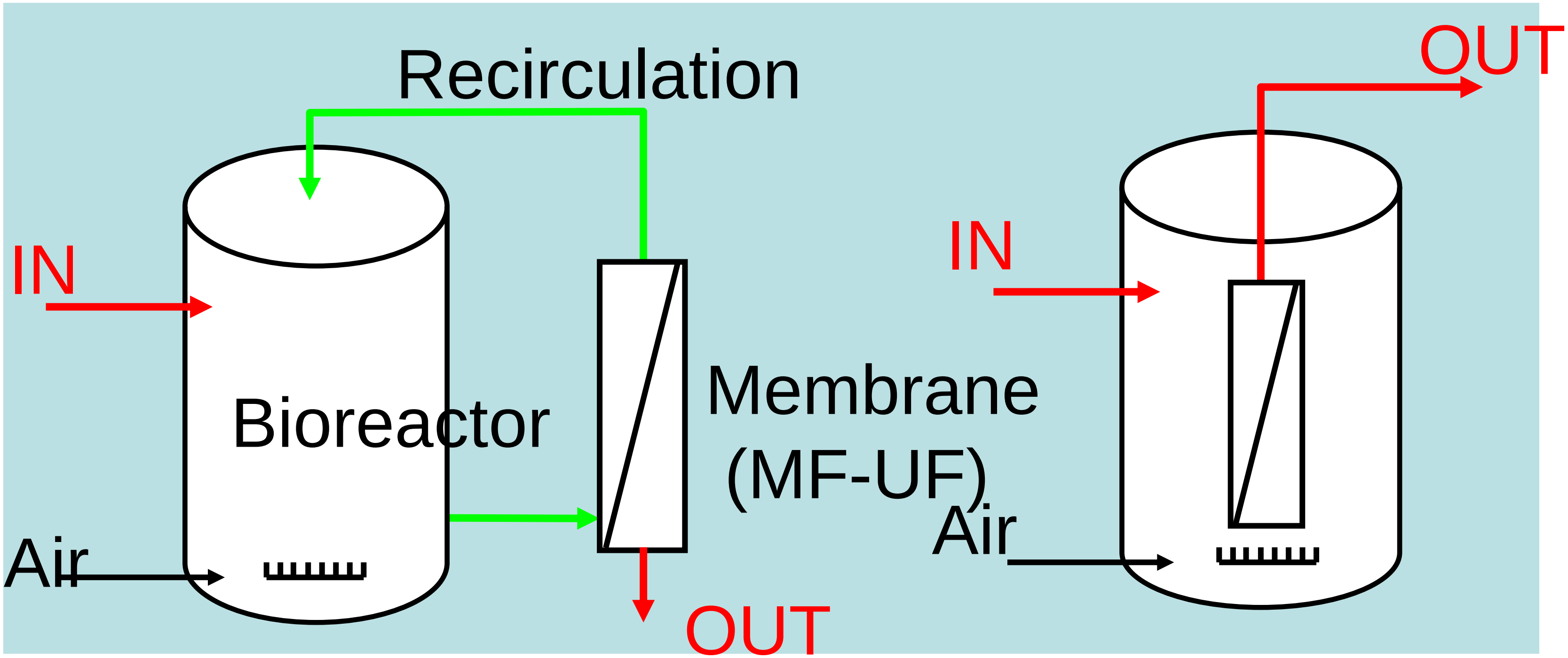
» MBR concept



» Conventional activated sludge system (CAS)



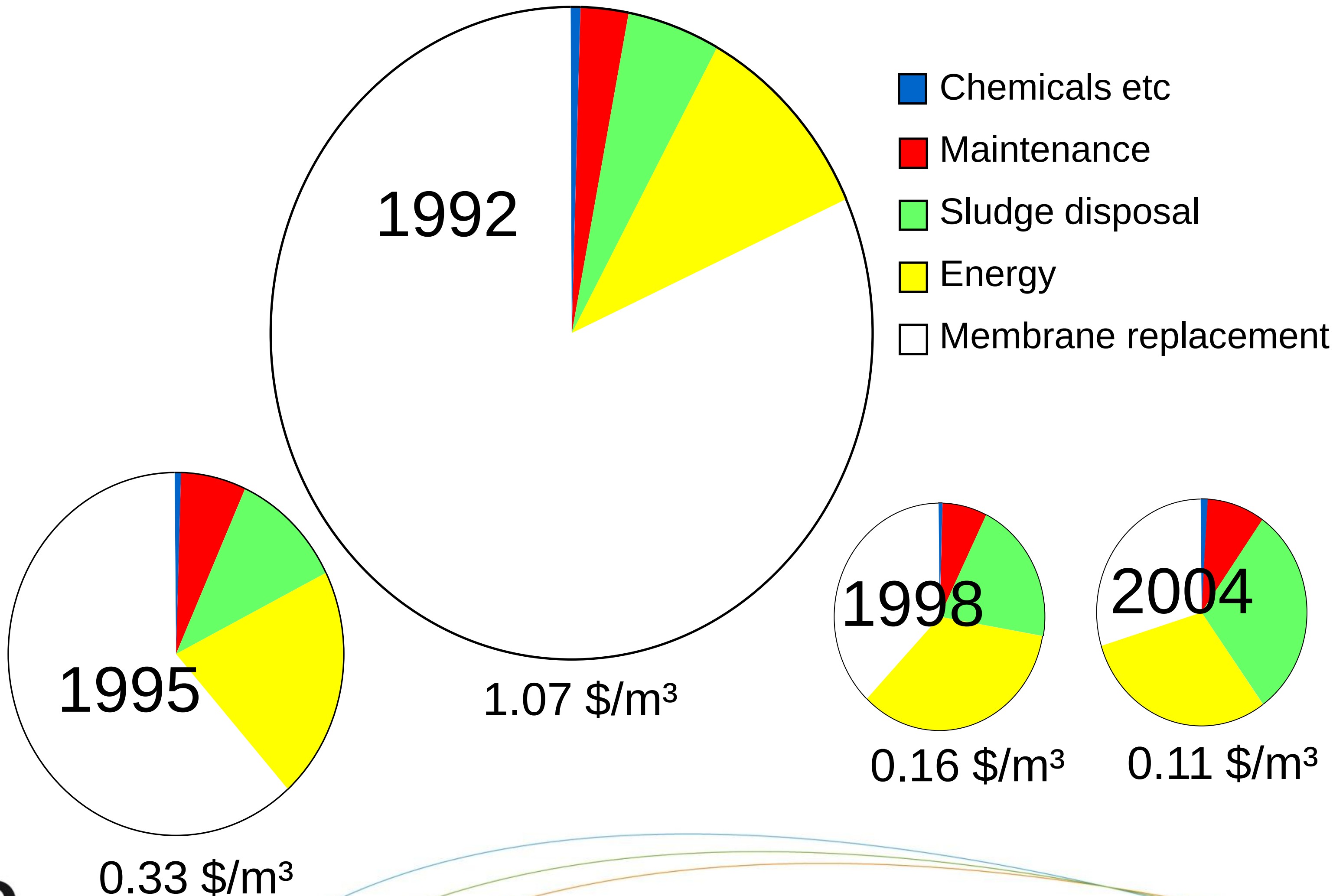
Membrane bioreactors: ≠ systems



EXTERNAL
- E cost: 5 kWh/m³
- Higher fluxes

SUBMERGED
- E cost: 0.2-0.5 kWh/m³
- Lower fluxes

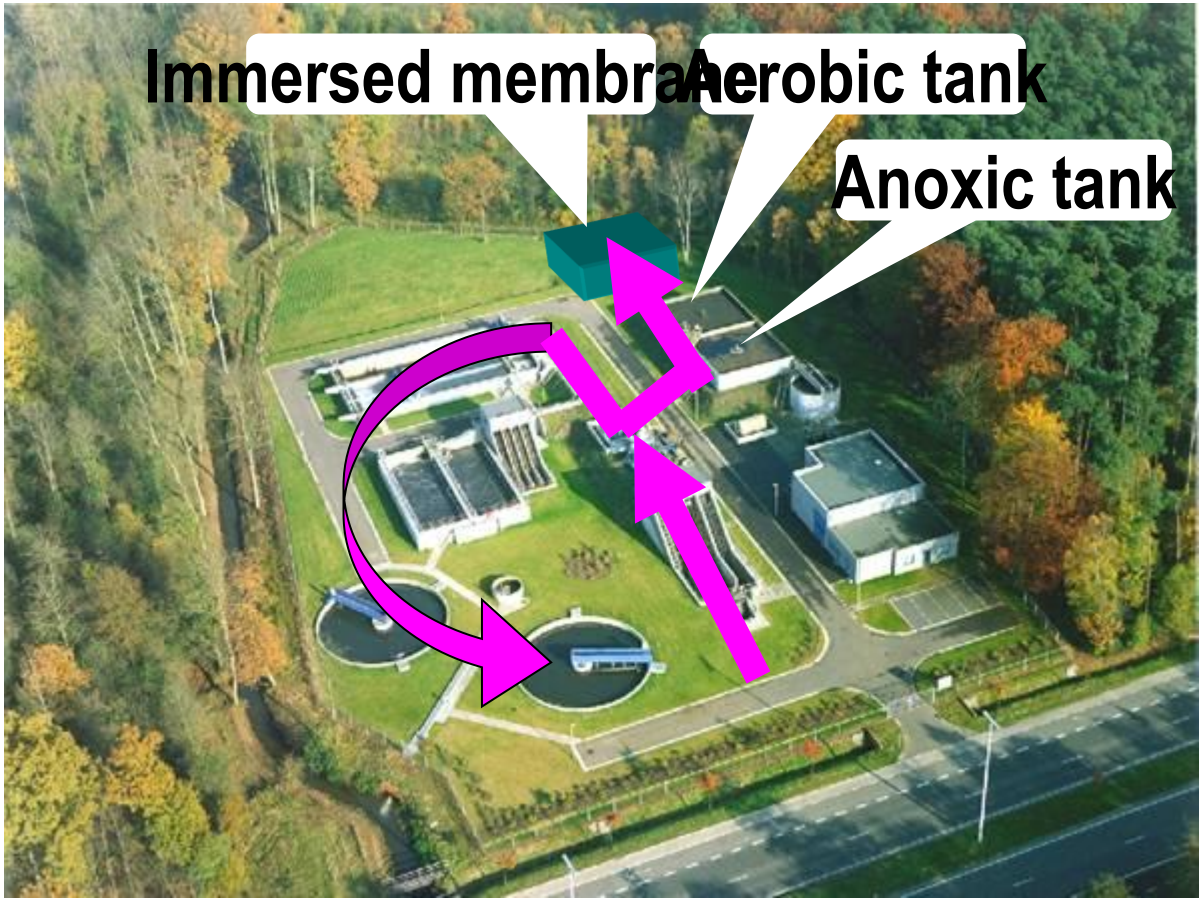
SUBMERGED MBR:
Evolution of maintenance costs



Source: S. Churchouse and D. Wildgoose, Membrane Technology No. 111, 2000

vito
vision on technology

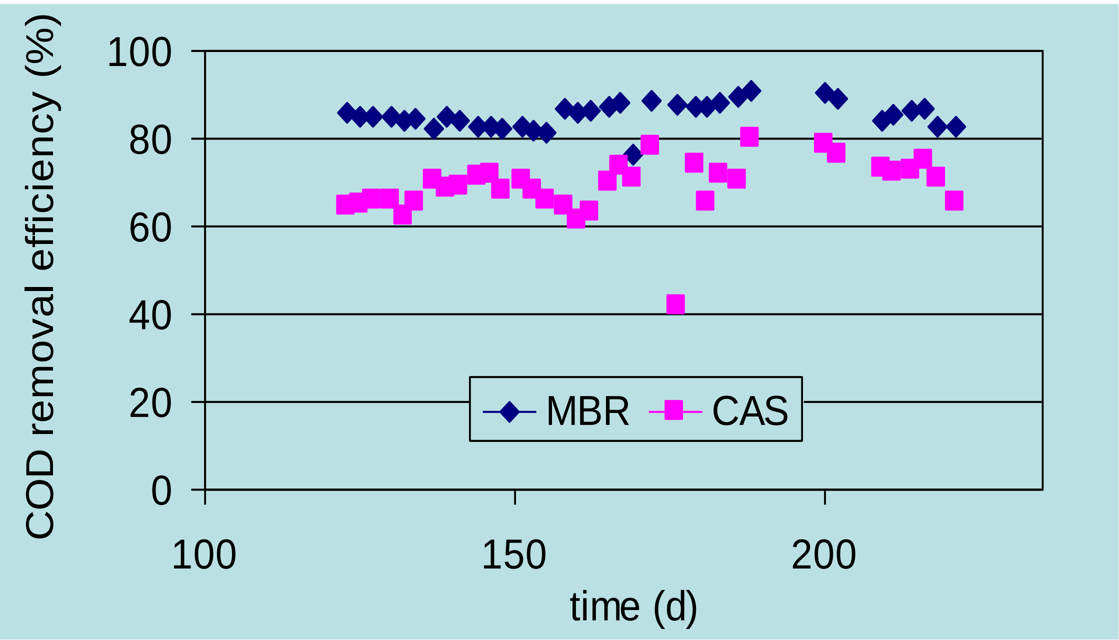
MBR at WWTP Schilde, ref. Aquafin



MBR at WWTP Schilde, ref. Aquafin

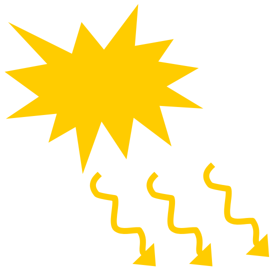
Submerged membrane bioreactor

Printing & dyeing wastewater



vito
vision on technology

CO_2 / NO_x conversion in algae biomass: downstream processing

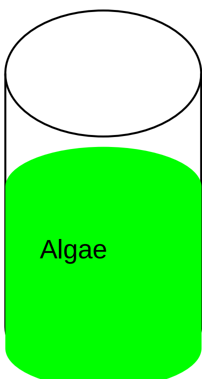


CO_2 →
NO_x →
water →

O_2

purification

- lipids
- proteins
- polysaccharides
- dyes
- chemicals
- ...

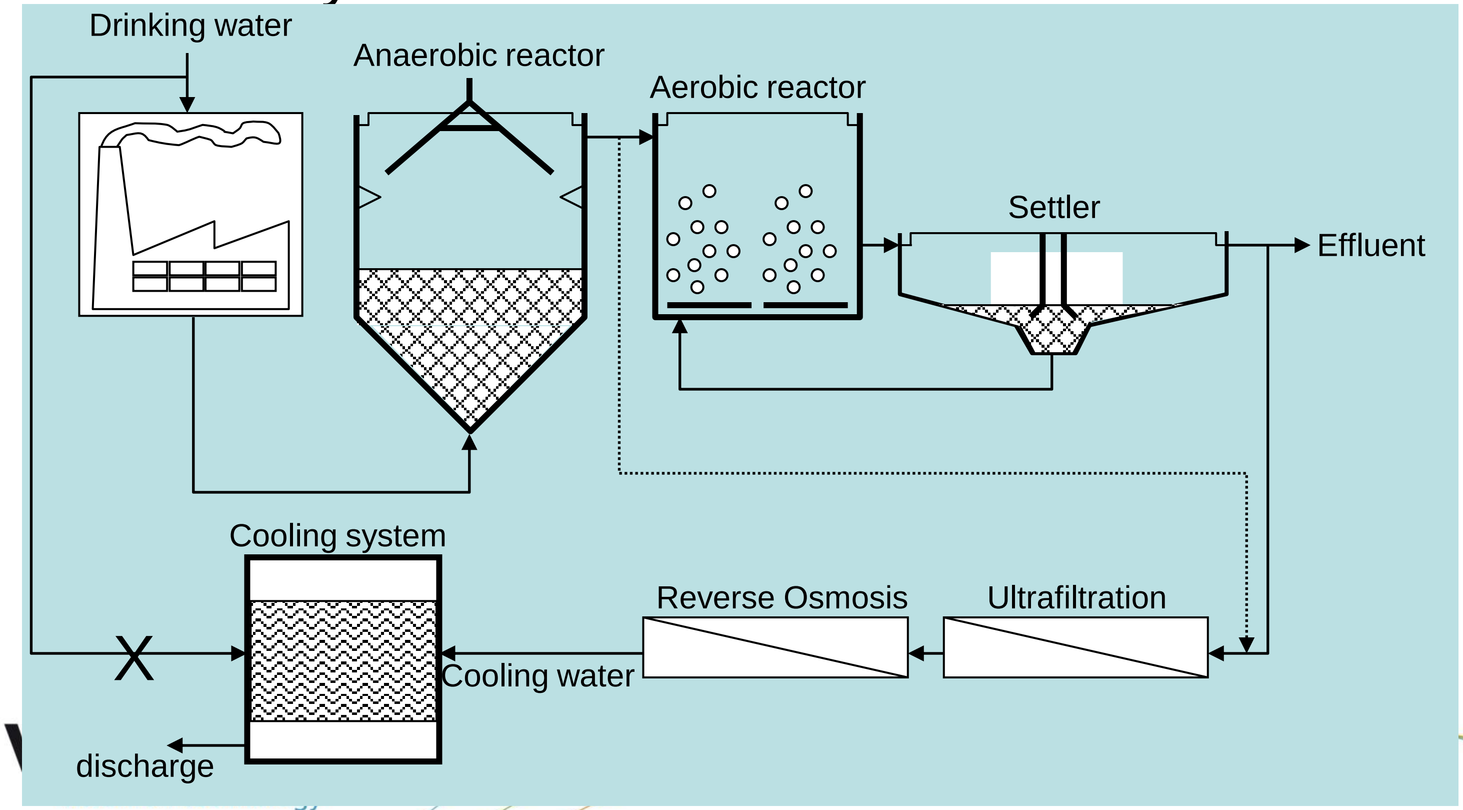


Cell disruption

vision on technology

CASES: Food industry

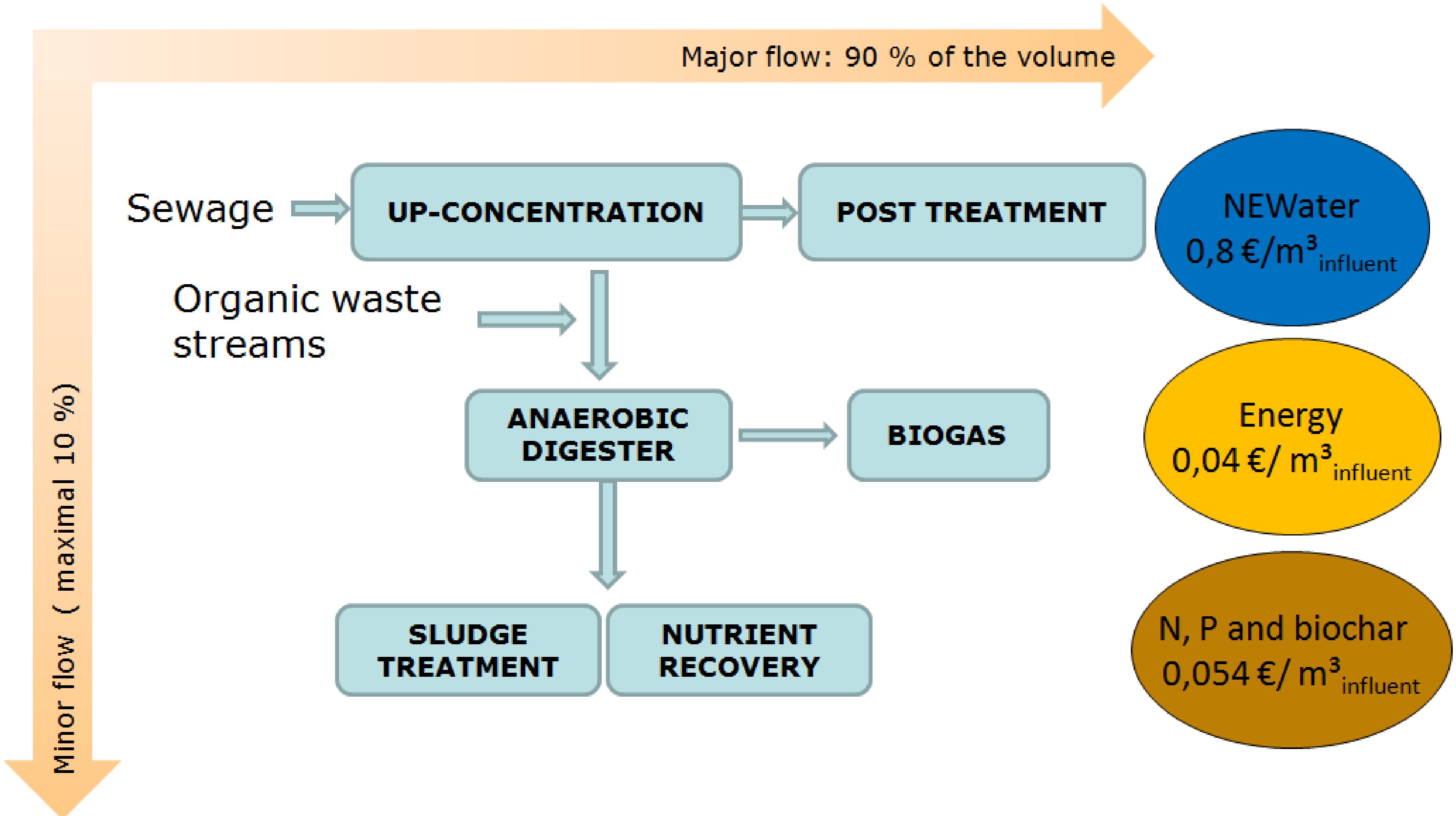
- Objective: reuse of effluent as cooling water
  - Flow rate: 40 m³/h
  - Effluent: SS: 200 mg/l + high salt conc. → RO necessary



Energy recovery from the integration of wastewater and waste

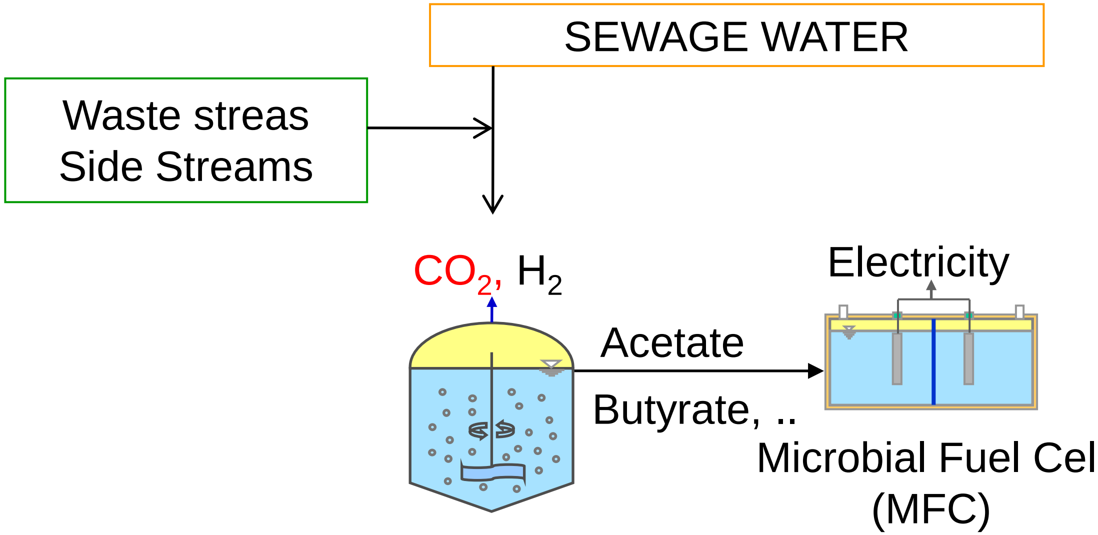
From energy consumption to energy production

SewagePlus: general concept

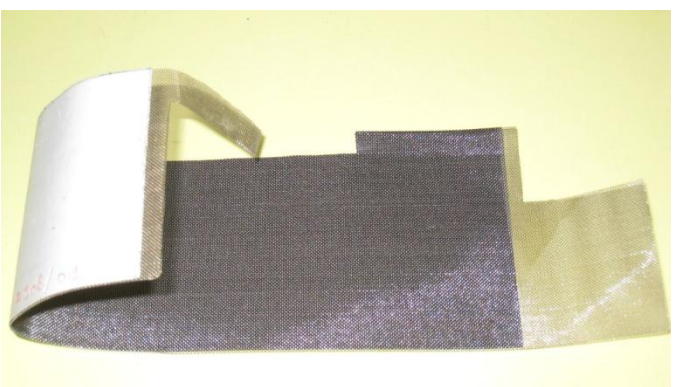


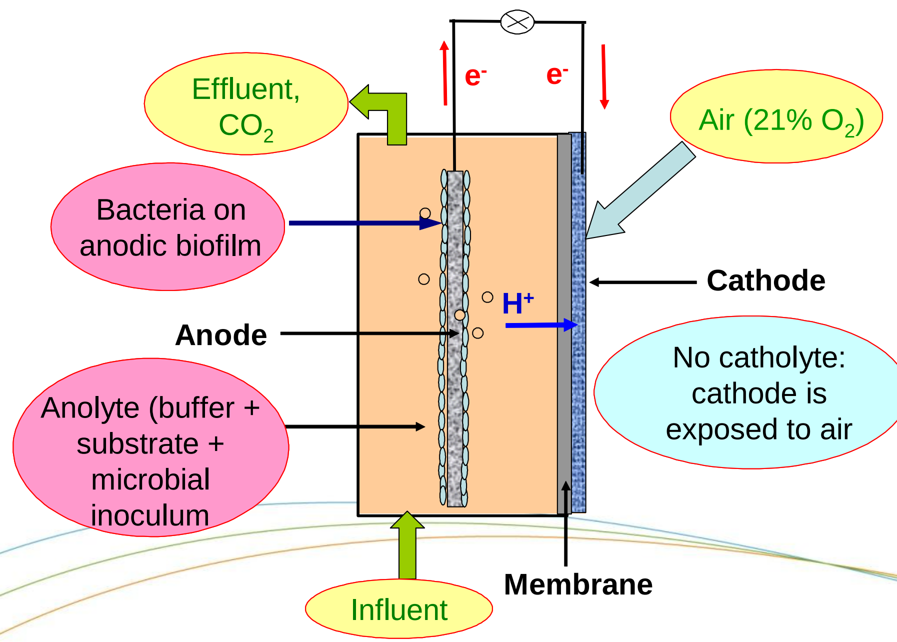
vito
vision on technology

SewagePlus: alternative



- Gas porous C-electrode with integrated PTFE-layer (air cathode)
- Zirfon® layer (ion permeable membrane) reduced ionic resistance and oxygen diffusion





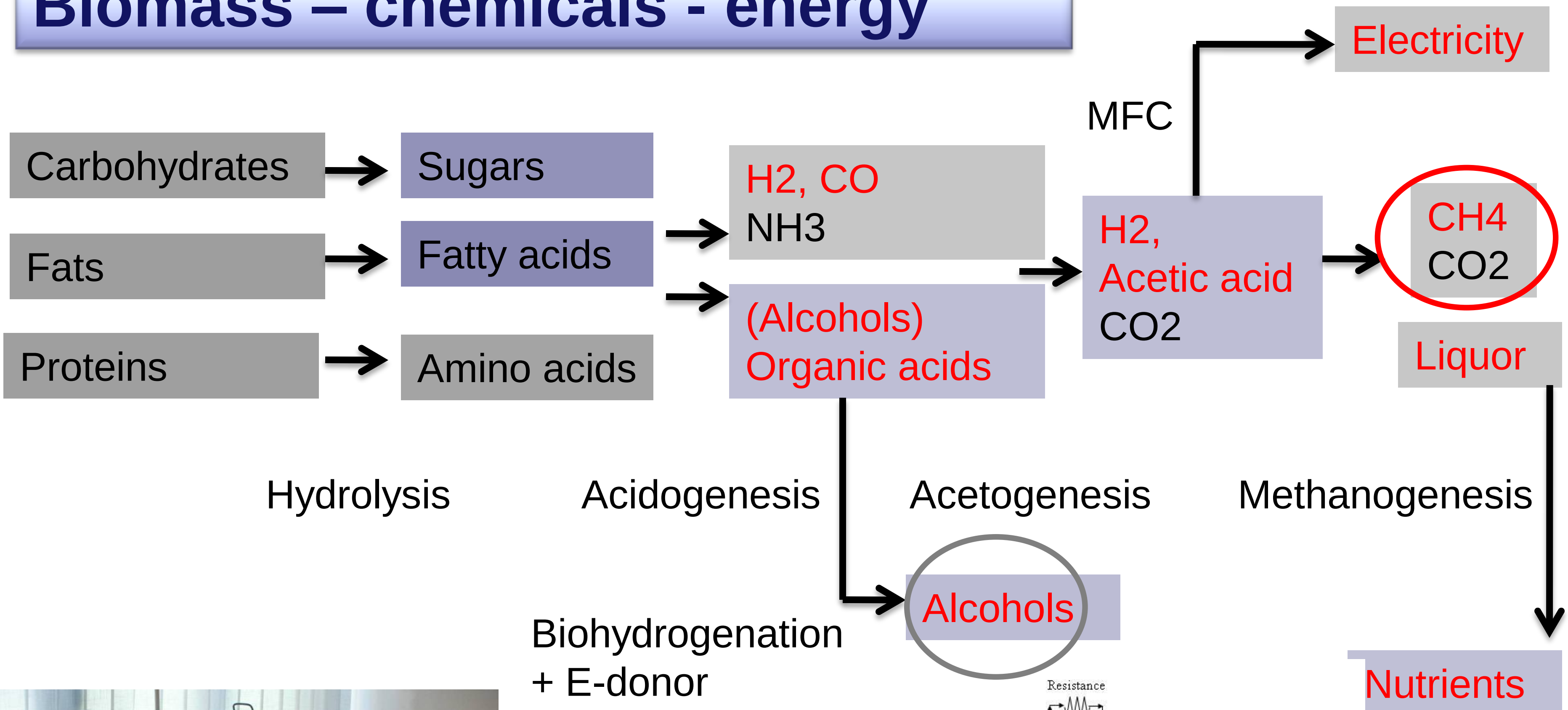
vito
vision on technology

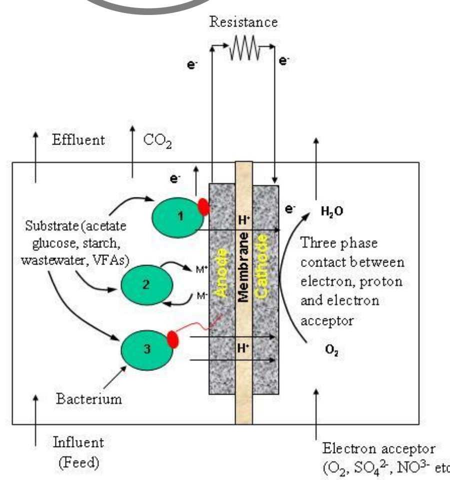
Biobased economy and waste water

Turn the threat in a challeng

vito
vision on technology

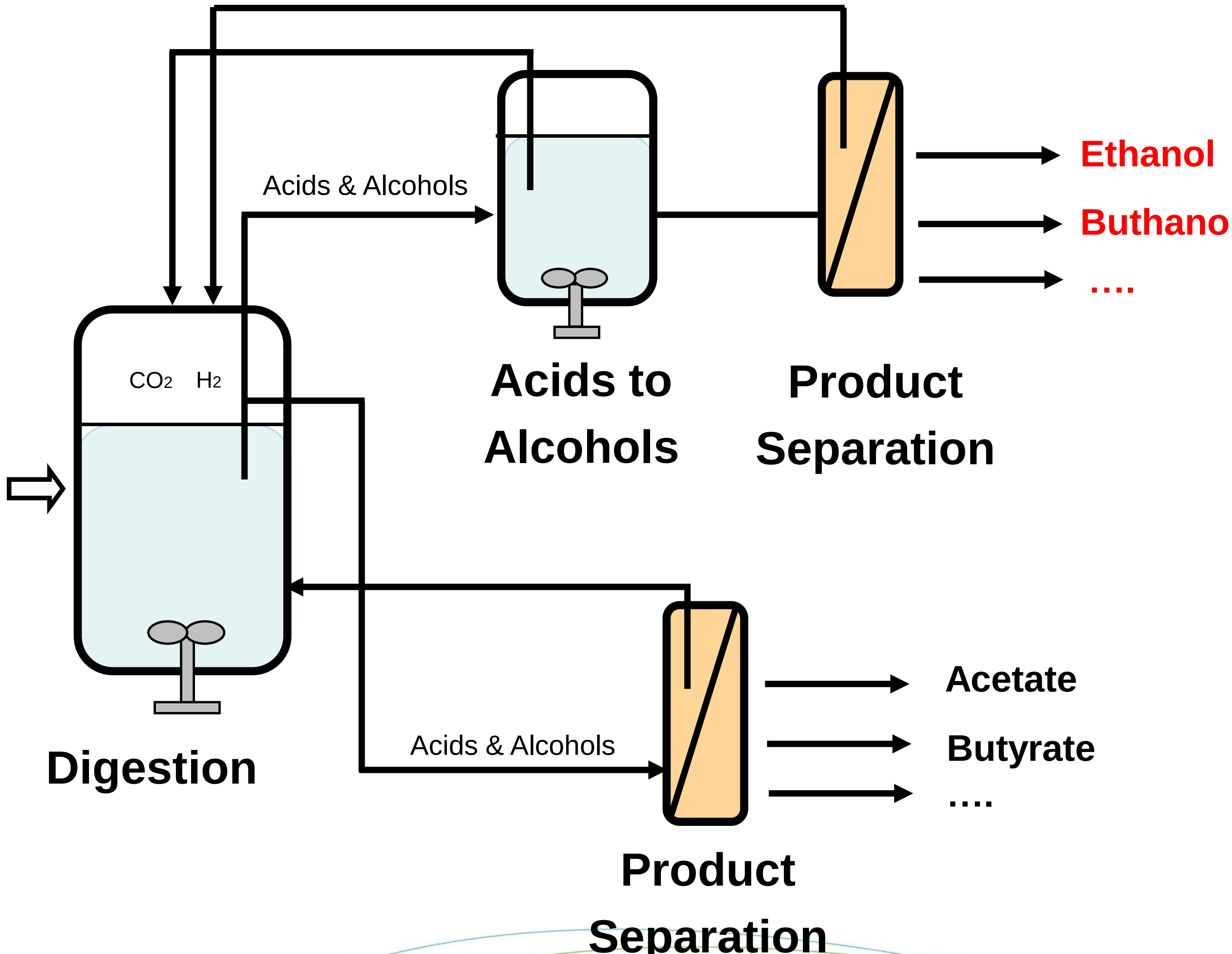
Biomass – chemicals - energy





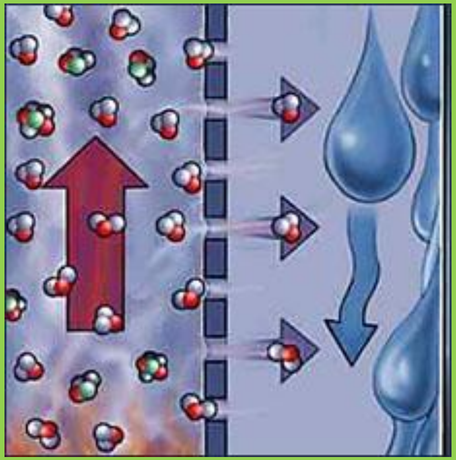
Waste and residues in biorefineries

Biorefinery wastewater



Novel concentrate treatment

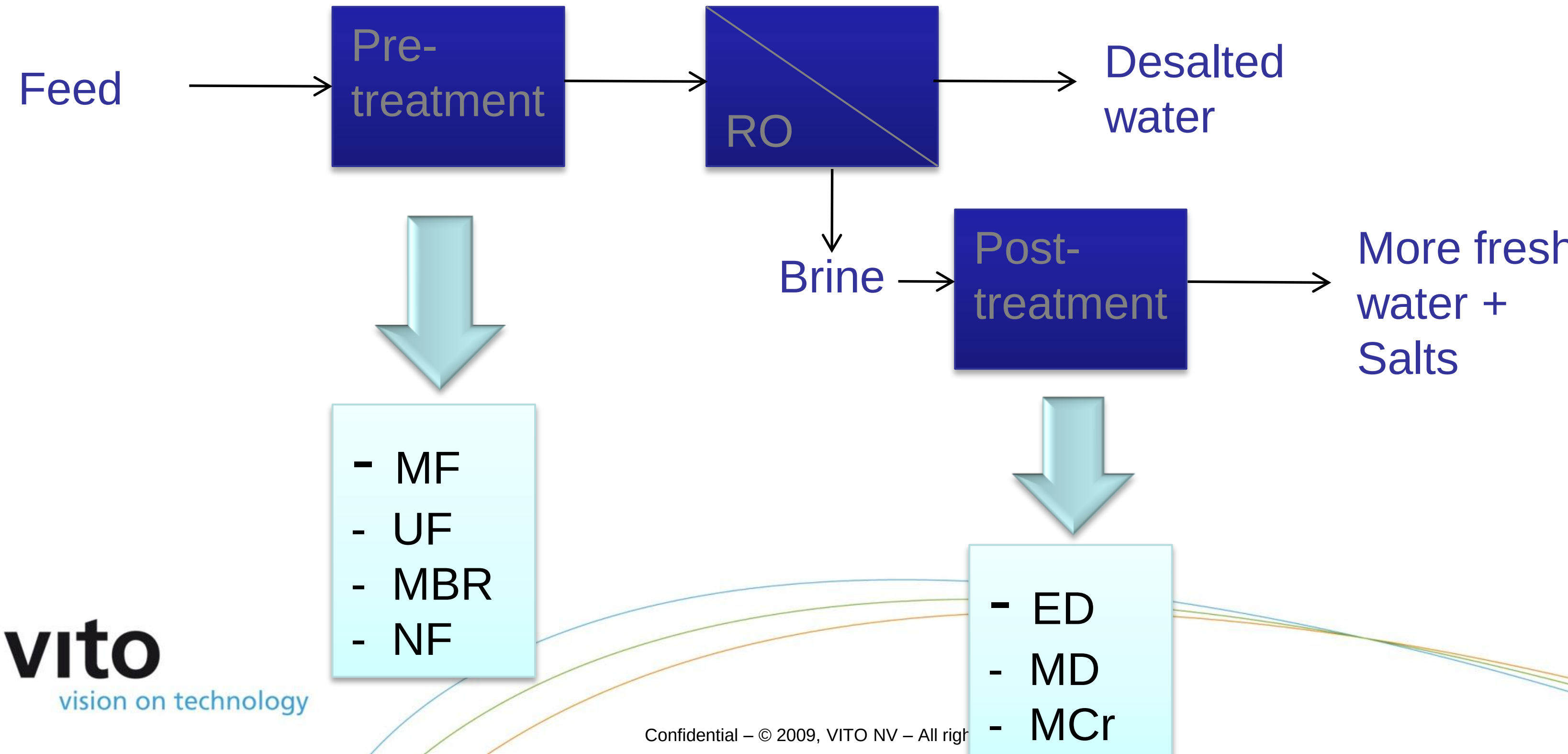
Towards zero discharge, recovery of salts, or energy



vito
vision on technology

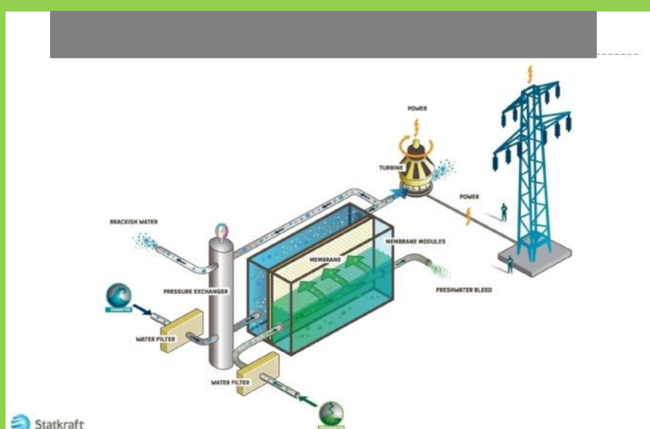
Potentialities of an integrated membrane based desalination system

- Enhancement of water recovery factor
- Improvement of water quality
- New brine disposal strategy
- Cost reduction



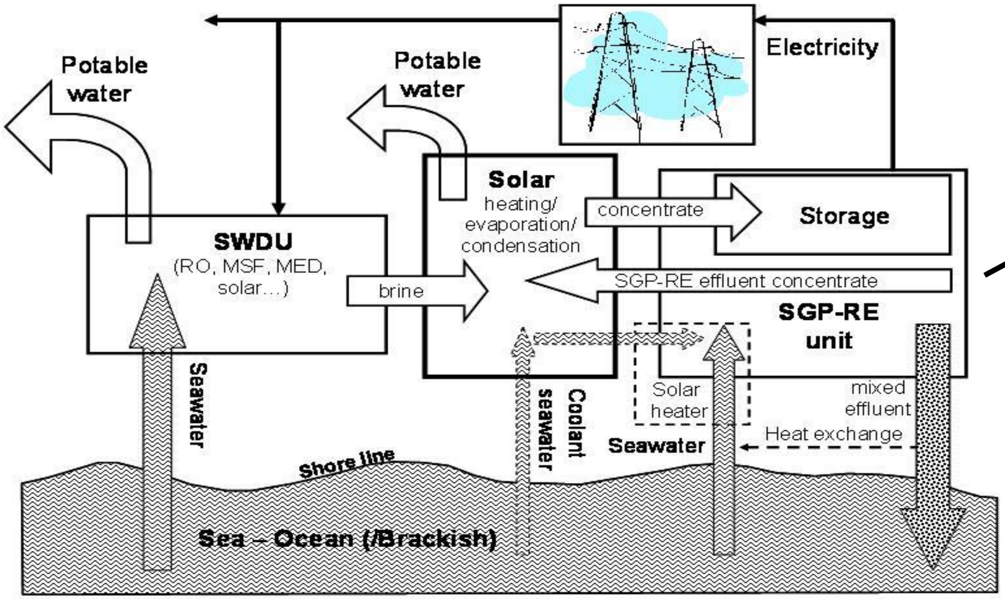
vito
vision on technology

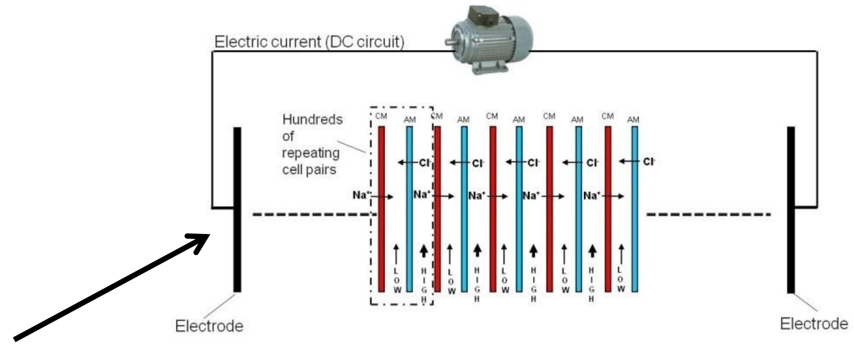
Technologies to generate power from salinity gradients



When fresh water meets salt water…

SGP-RE – application concept





Reapower High concentration = brine

Low concentration = sea or brakisch water

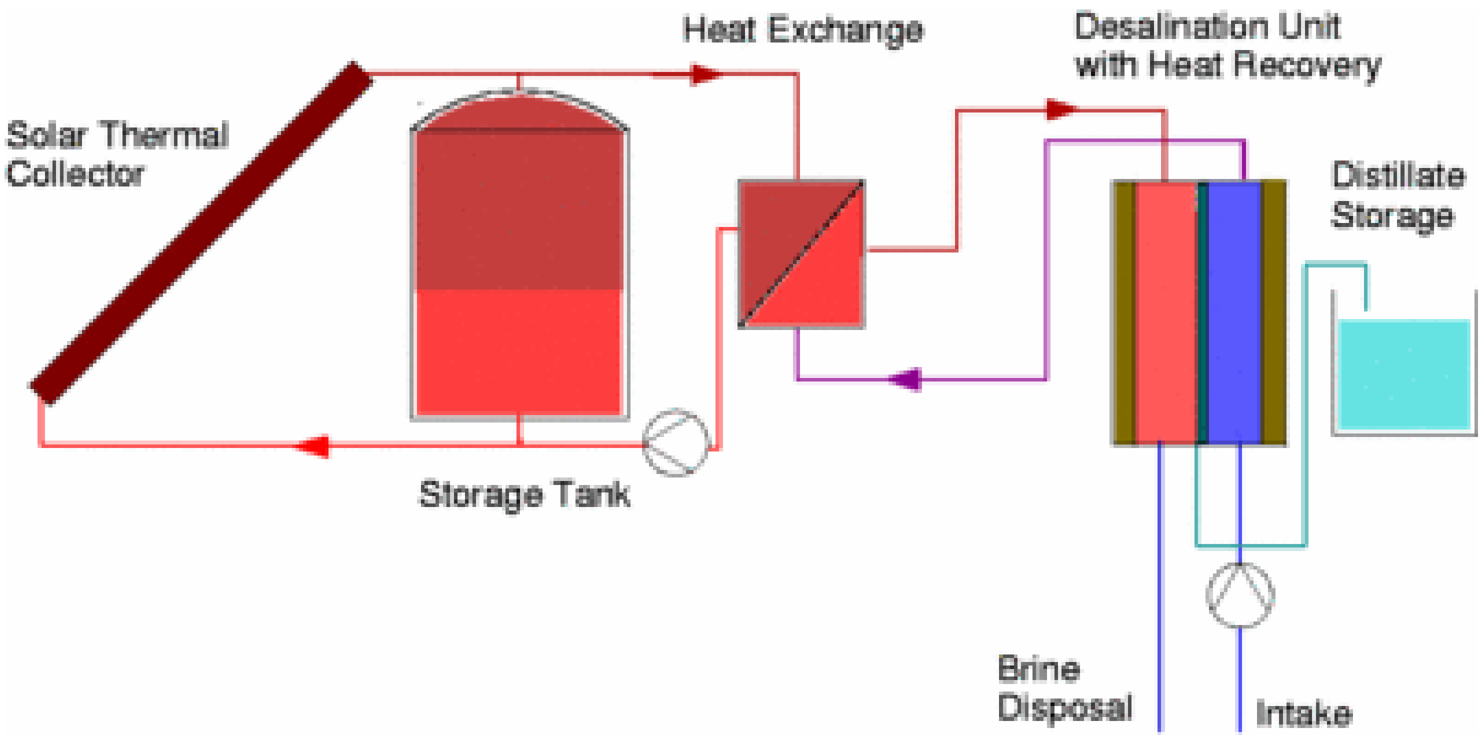
Power density ? (target >= 8 W/m²)

Water treatment systems coupled with renewable energy sources

Reduction of carbon footprint

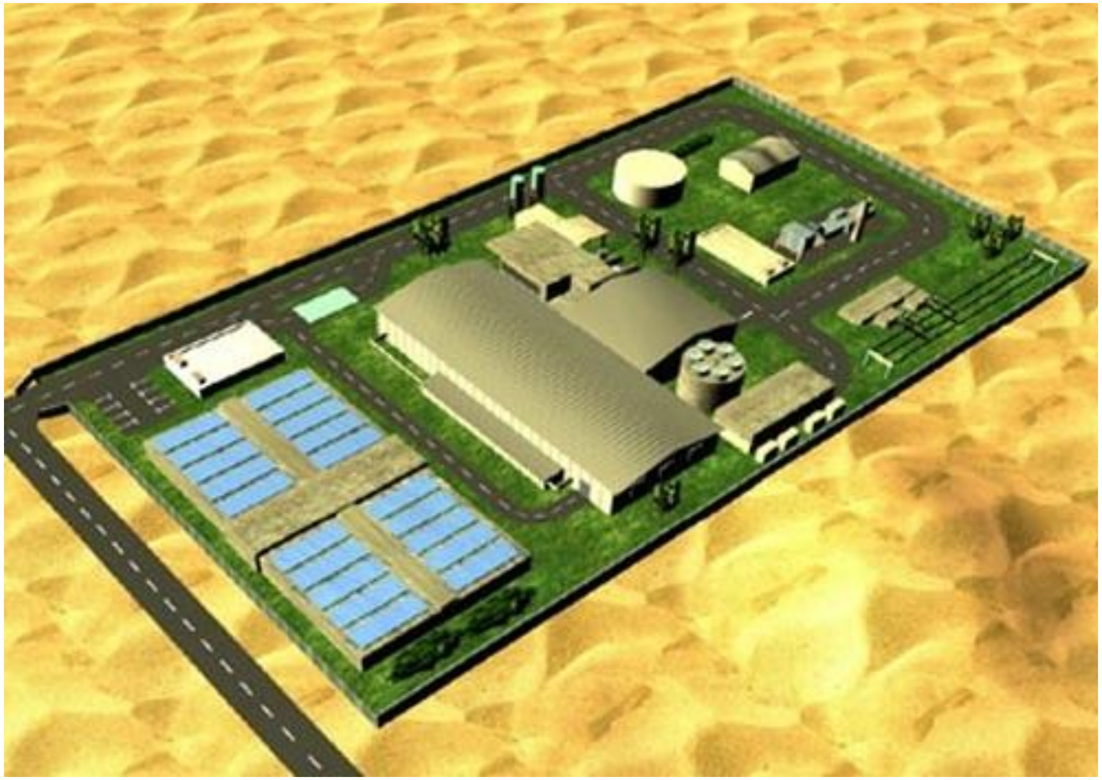
vito
vision on technology

Solar MD (Solarsprings)



vito
vision on technology

Desalination

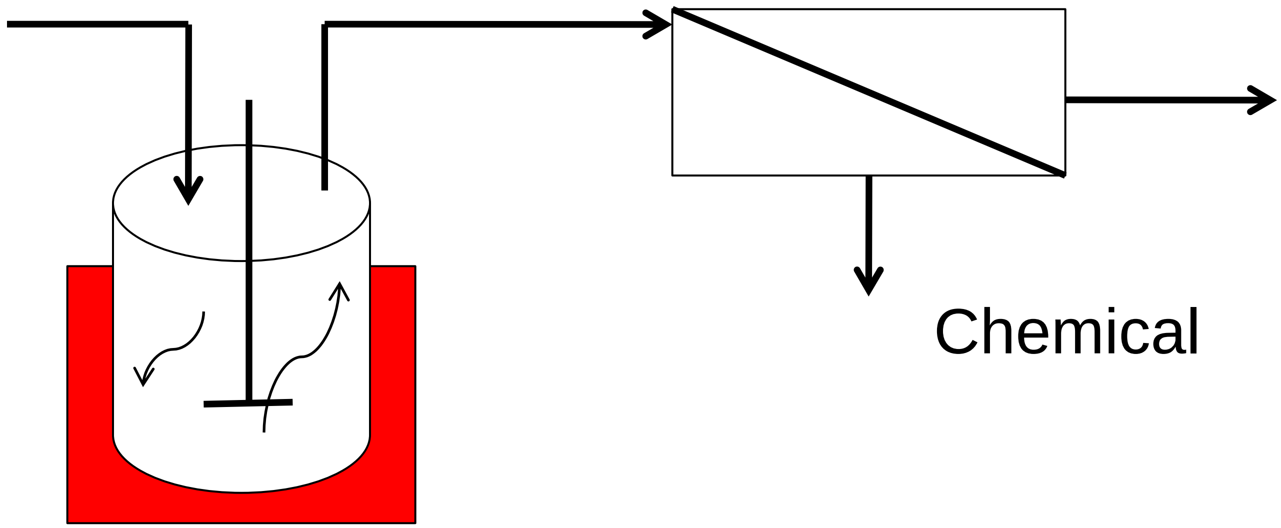


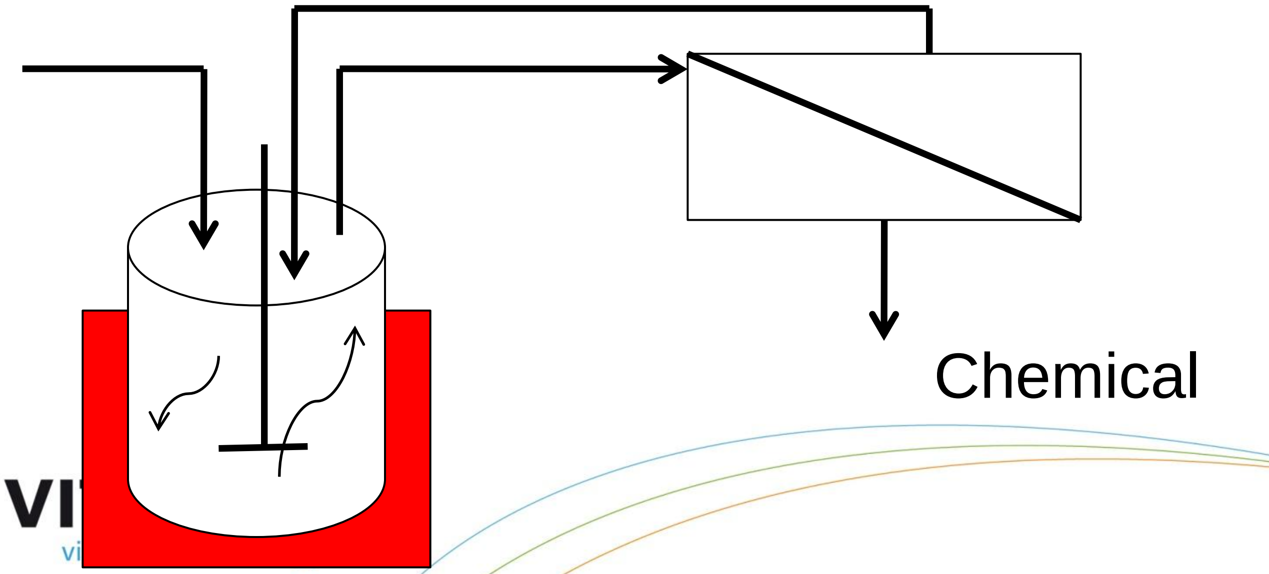
Ashkelon desalination plant (250 million $) in Israel produces 100 million m³/yr of desalinated water

OUTLINE

1. Inleiding
2. Membranen / Modules en ontwerp
3. Procesparameters en fouling
4. Overzicht waterige membraantoepassingen
5. Case-studies membranen voor waterzuiveringstoepassingen
6. **Overzicht en case-studies niet-waterige membraantoepassingen**
7. Conclusies

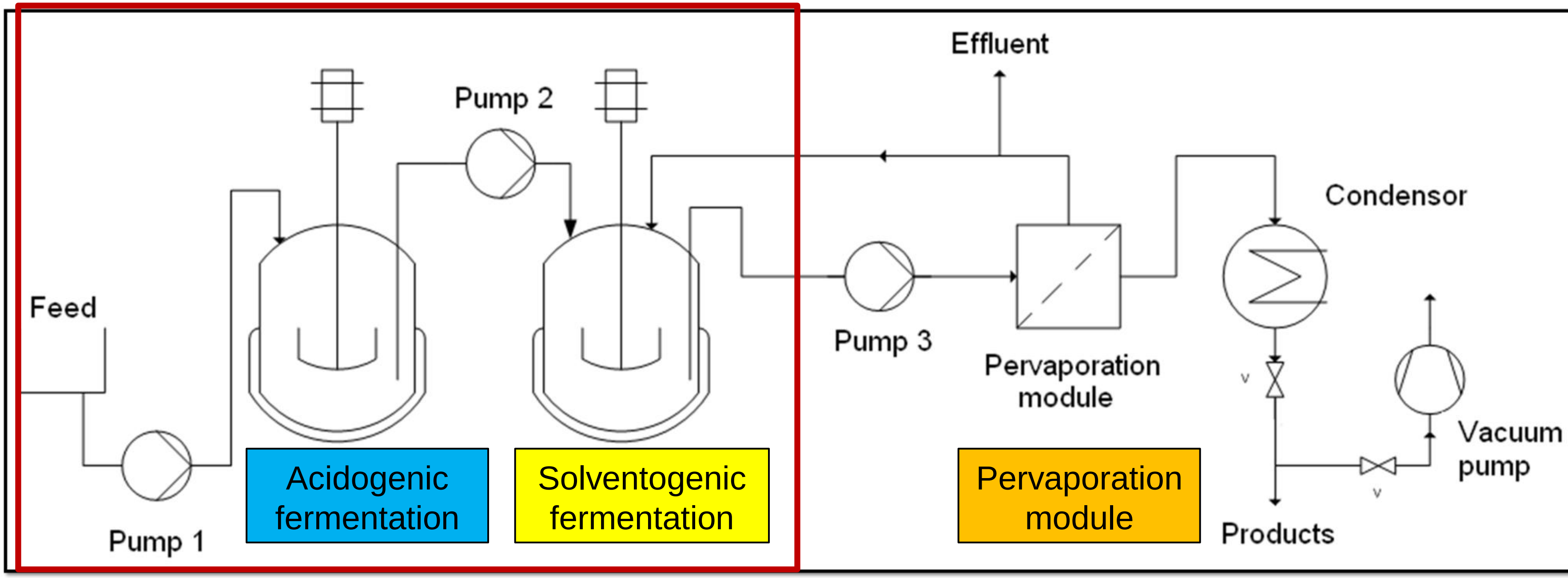
Integrate conversion with downstream processing





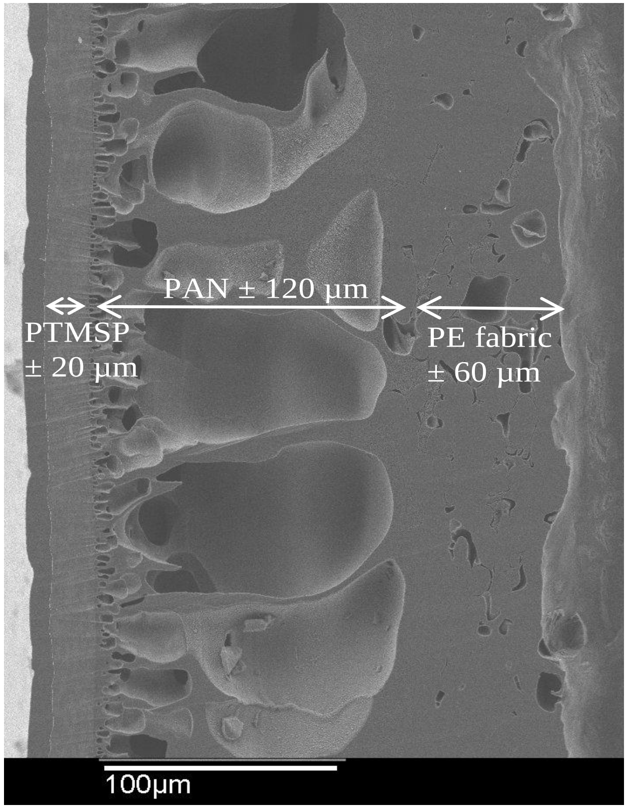
In situ alcohol recovery by organophilic pervaporation

Integration of conversion and membrane separation to improve overall efficiency



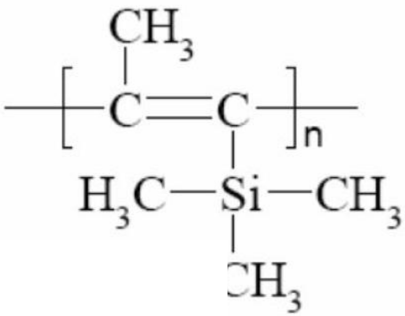
- Pervaporate concentration from 60 – 180 g/L
- Productivity enhancement of 87%
- Use of concentrated feedstocks
- Development of special membranes!!!

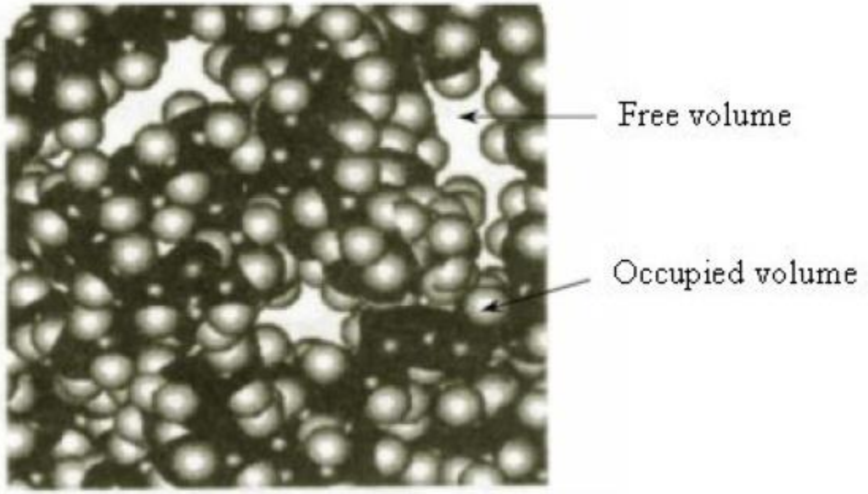
Development of novel OPV membrane for alcohol/water separations



» Mixed matrix membranes:

- ✓ PVDF support membrane on non-woven
- ✓ Thin layer of silica-filled PTMSP

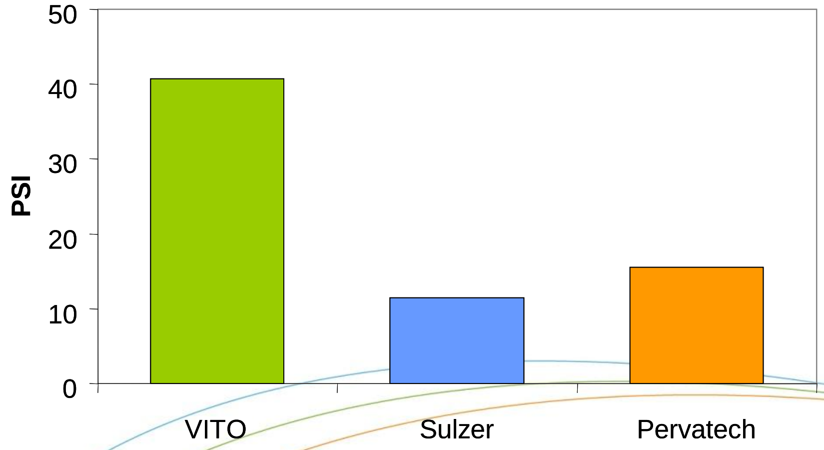




OPV on $EtOH/H_2O$

$EtOH/H_2O$ (10 wt%); 50°C

Sample	Thickness selective layer (µm)	Flux ($kg.m^{-2}.h^{-1}$)	α ($EtOH/H_2O$)	PSI
VITO	± 10	3.7 ± 1.3	12 ± 2	41
PERVAP 4060	± 2	1.9 ± 0.5	7 ± 2	11
Pervatech	± 2	3.3 ± 0.3	6 ± 1	15



vito
vision on technology

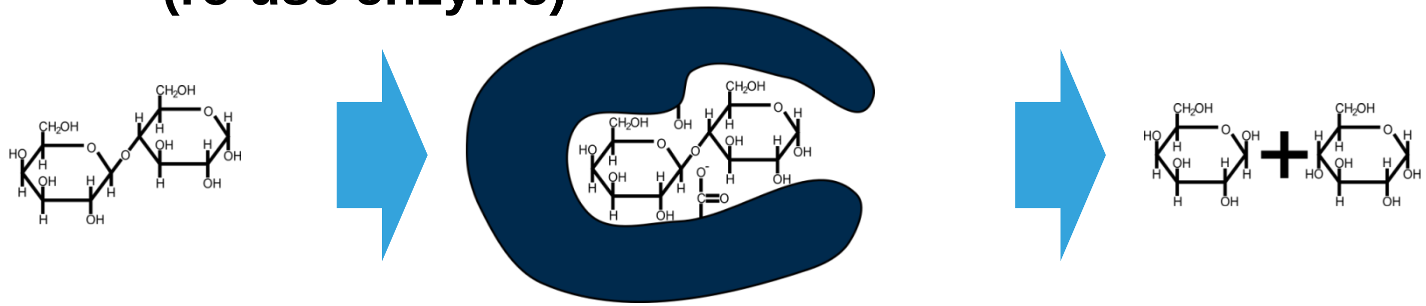
In situ alcohol recuperatie door organofiele pervaporatie

2 staps buthanol fermentatie

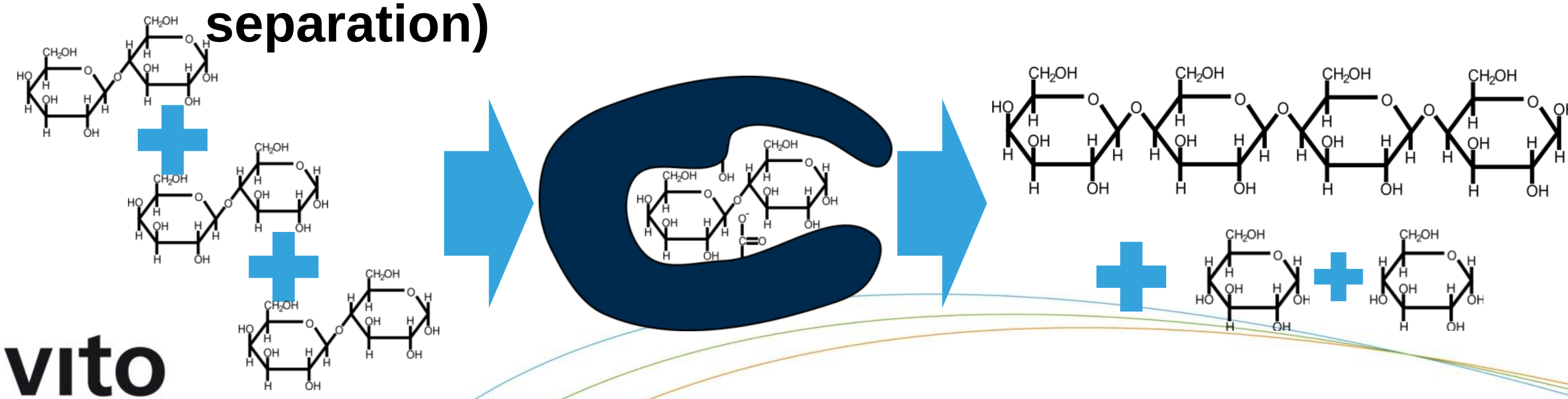
Geïntegreerde downstreamprocessing

Three applications of enzyme immobilisation @ VITO

1. Hydrolysis of lactose by immobilized β-galactosidase (re-use enzyme)

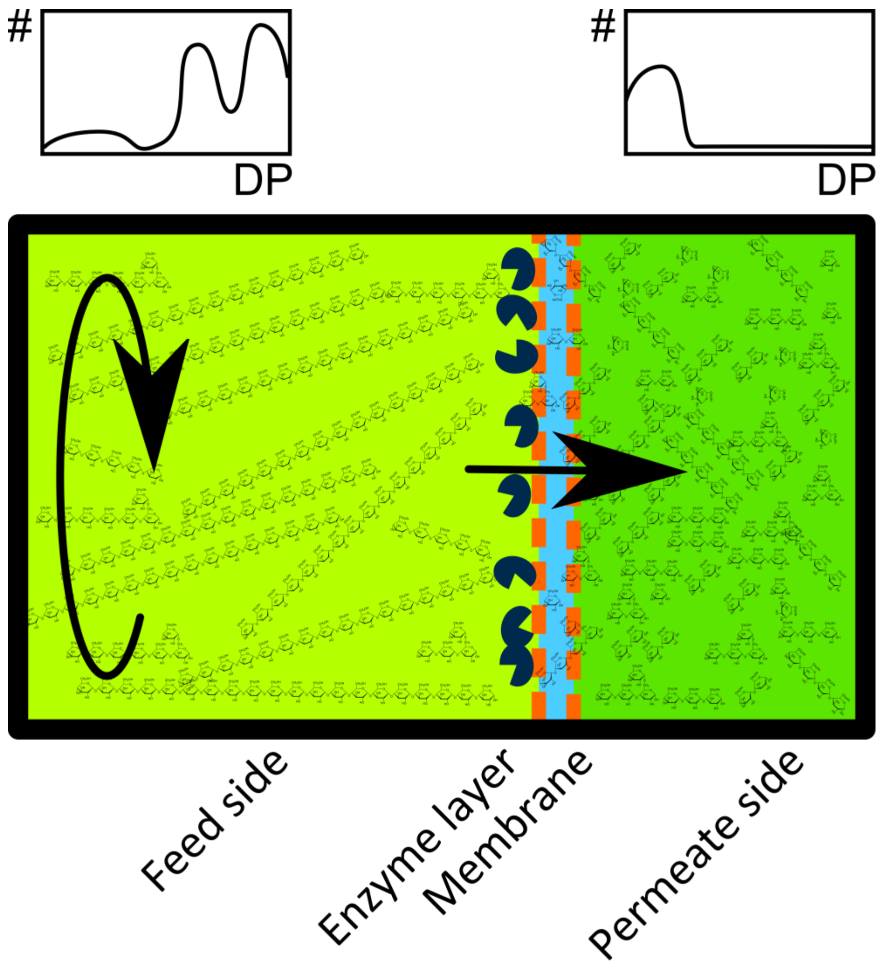


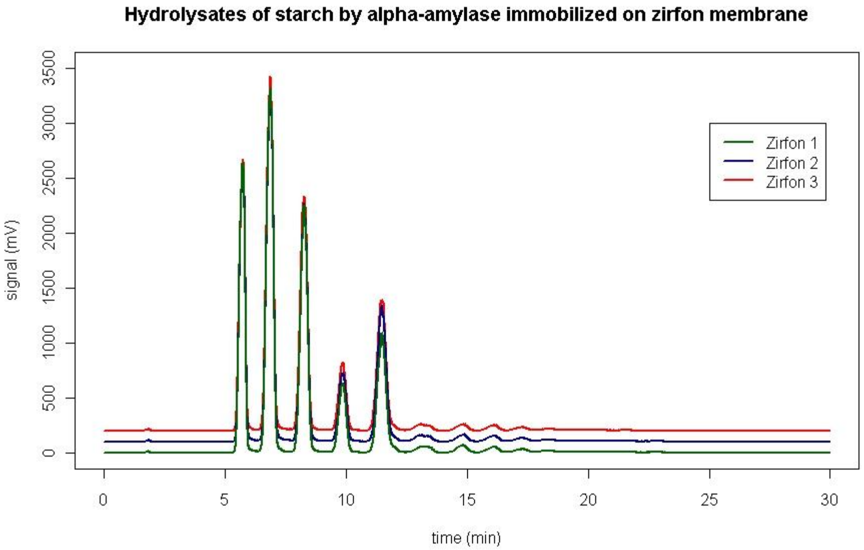
2. Synthesis of galacto-oligosaccharides (GOS) by immobilized β-galactosidase (re-use enzyme and separation)



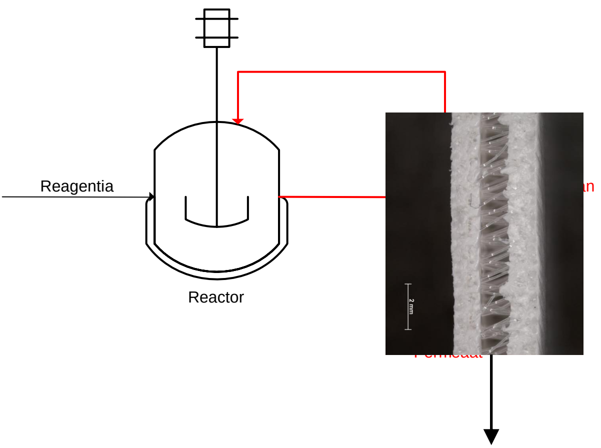
vito
vision on technology

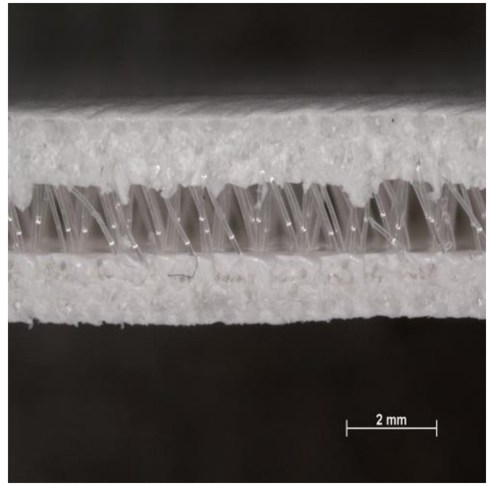
Enzyme immobilisatie

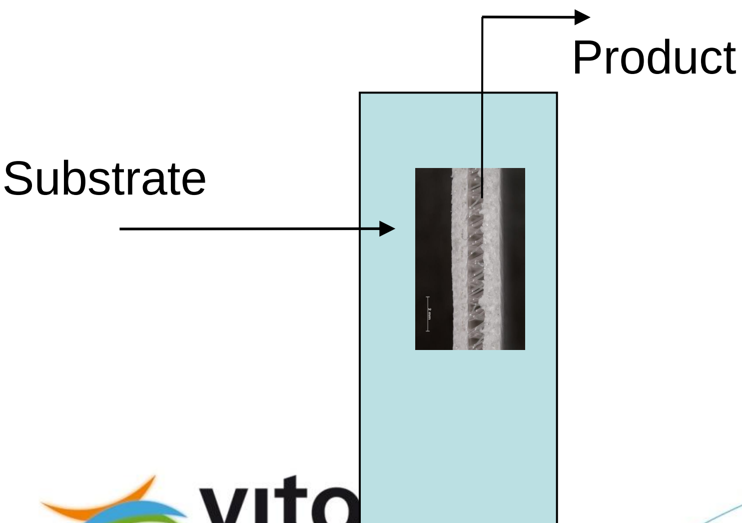


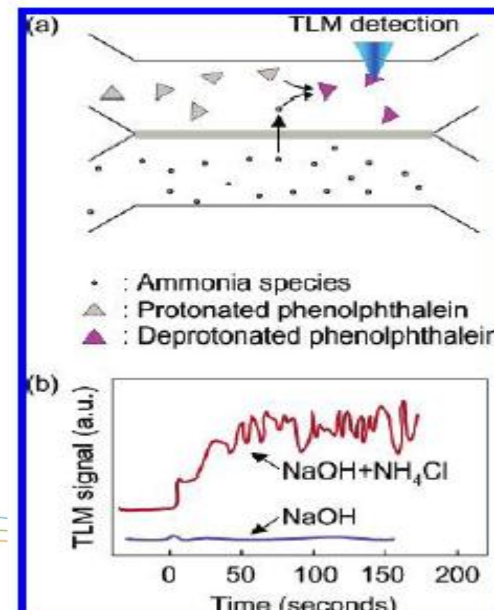


IPC and membrane (bio)reactors





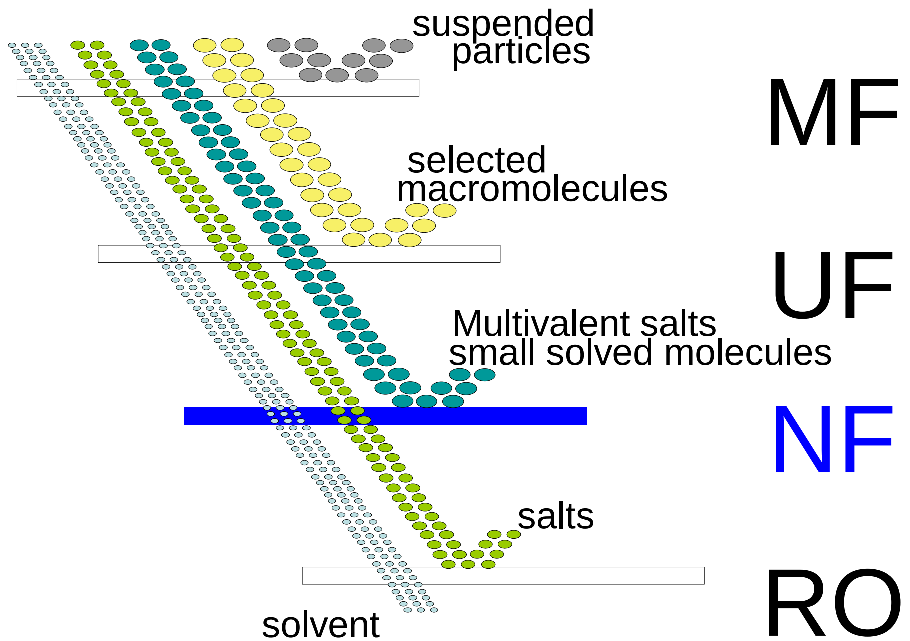




Solvent nanofiltration : SRNF

- Cut-off 200 – 1000 Dalton
- Retention small organic components
- Charged membrane : retention multivalent ions

MF	0.1 - 3 bar 0.1 - 20 µm
UF	2 - 10 bar 2 nm - 0.1 µm
NF	5 - 30 bar ≈ 1 nm
RO	10 - 100 bar 0.1 - 1 nm (dicht)



vito
vision on technology

SRNF applications

- Solvent recovery/recuperation :
  - Aceton in oleochemistry, hexane and ethanol in extractions, solvent in paint and polymer production,….
- Color removal from waste streams e.g. in textile industry
- Solvent exchange (high-boiling to low-boiling)
- Concentration of antibiotics, pharmaceutics, …
- Purification of pharmaceuticals or other products :
  - Removal of impurities, higher polymers or other by-products
- Separation /recovery of homogeneous catalysts
- Coupling reaction and filtration :
  - By removal of products equilibrium shift of the reaction
- …

vision on technology

Implementations of ceramic NF membranes

- modified inuline stream
- removal of NMP < 0.1 wt%
- diafiltration with water
- installation 24 m^2
- flux 1 m^3/h
- no product loss
- re-use of permeate ~100%

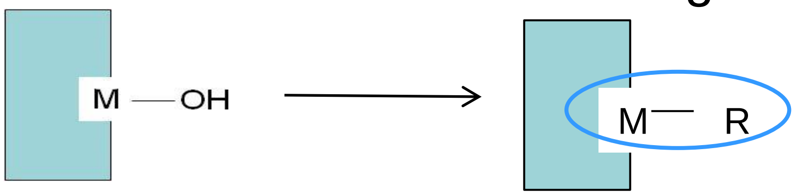
- colored textile waste water
- removal of color > 70 à 100 %
- concentration factor 10 à 20
- installation 25 - 65 m^2
- flux 5 m^3/h
- running since 2002

vito vision on technology

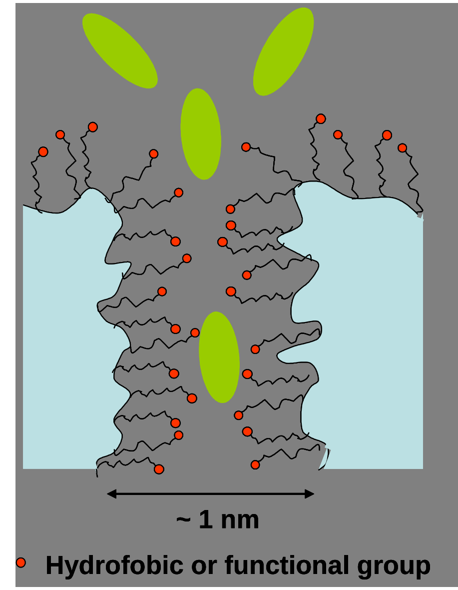
www.Inopor.com

Need for better separation techniques

- Only rely on energy consuming separation technology?
- Post-modification based on organometal chemistry



direct, covalent bond
highly stable



- High-selective NF membranes (template assisted synthesis)

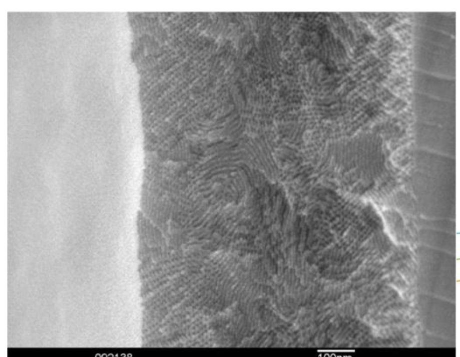
Template-assisted SiO_2-layer on dense support → Template-assisted TiO_2-layer on porous support

↓

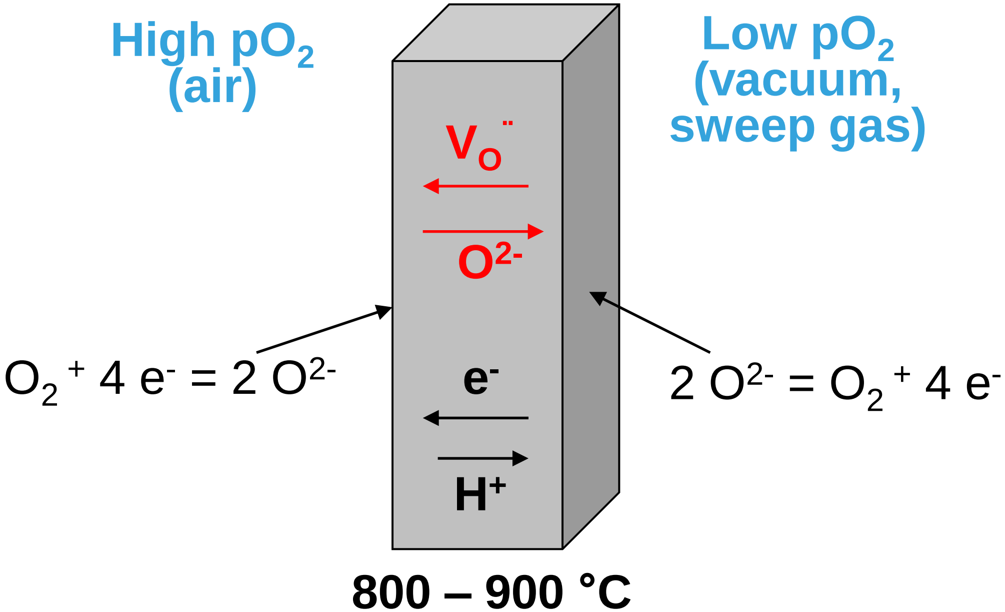
Uniform nano-pores

↓

High-selective NF



Dense mixed ion/electron conductors (MIEC)



ABO_3 perovskite structure
High values of mixed conductivity

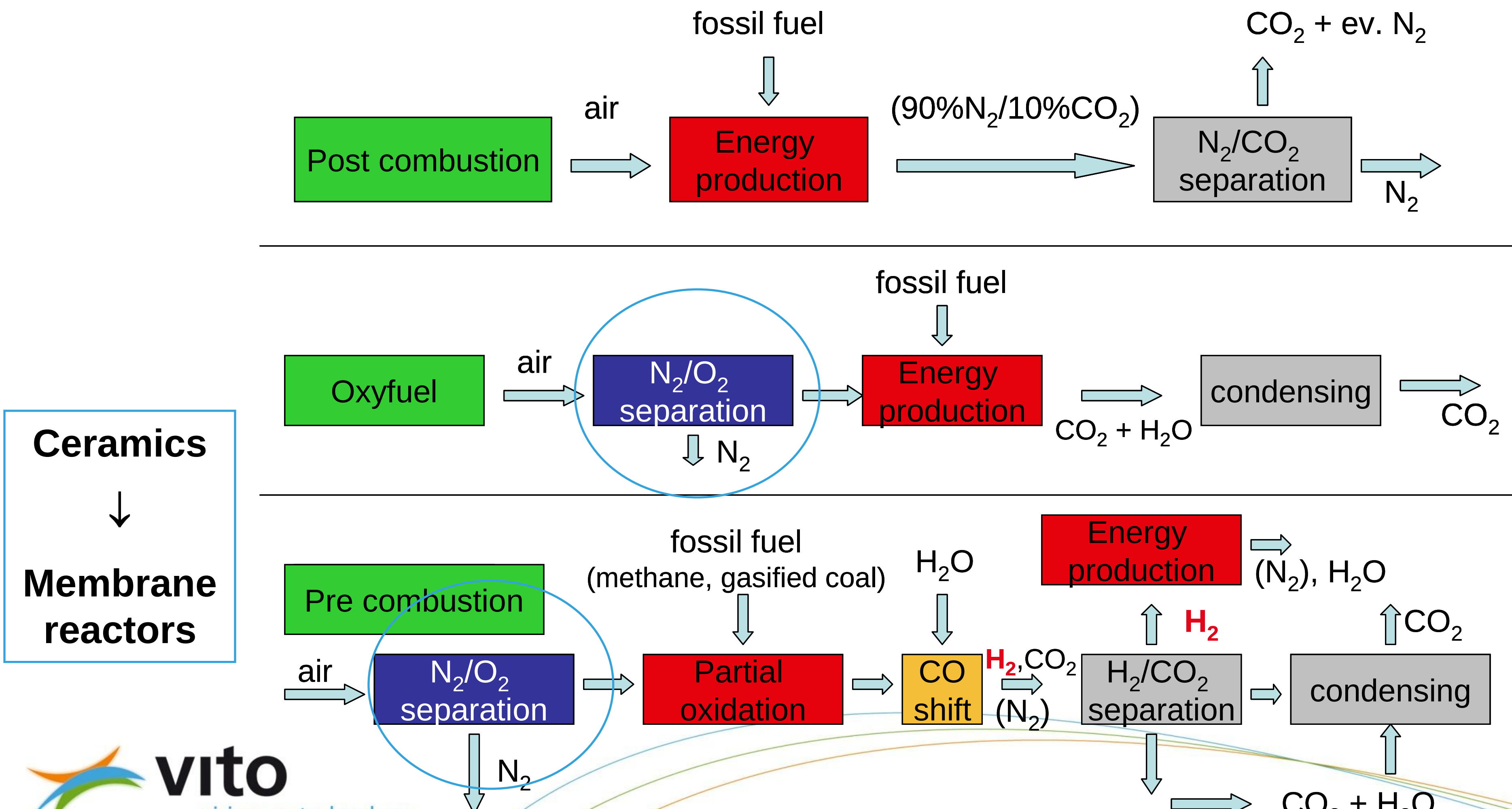
- Partial substitution of metal cations by cations with lower valencies
  → formation of oxygen vacancies $V_O^{\cdot\cdot}$
  → formation of oxygen non-stoichiometry : $AA^*BB^*O_{3-\delta}$
  → possibility of oxygen to be transported over the material

  ⟶ 100% selectivity
- Oxygen non-stoichiometry depends on doping, pO_2 and T
- Multivalent cations ensure high electron conductivity

vito vision on technology

Energy application of mixed ion electron conductors

- Gas separation in zero-emission power plants
- Very large installations necessary!



vito vision on technology

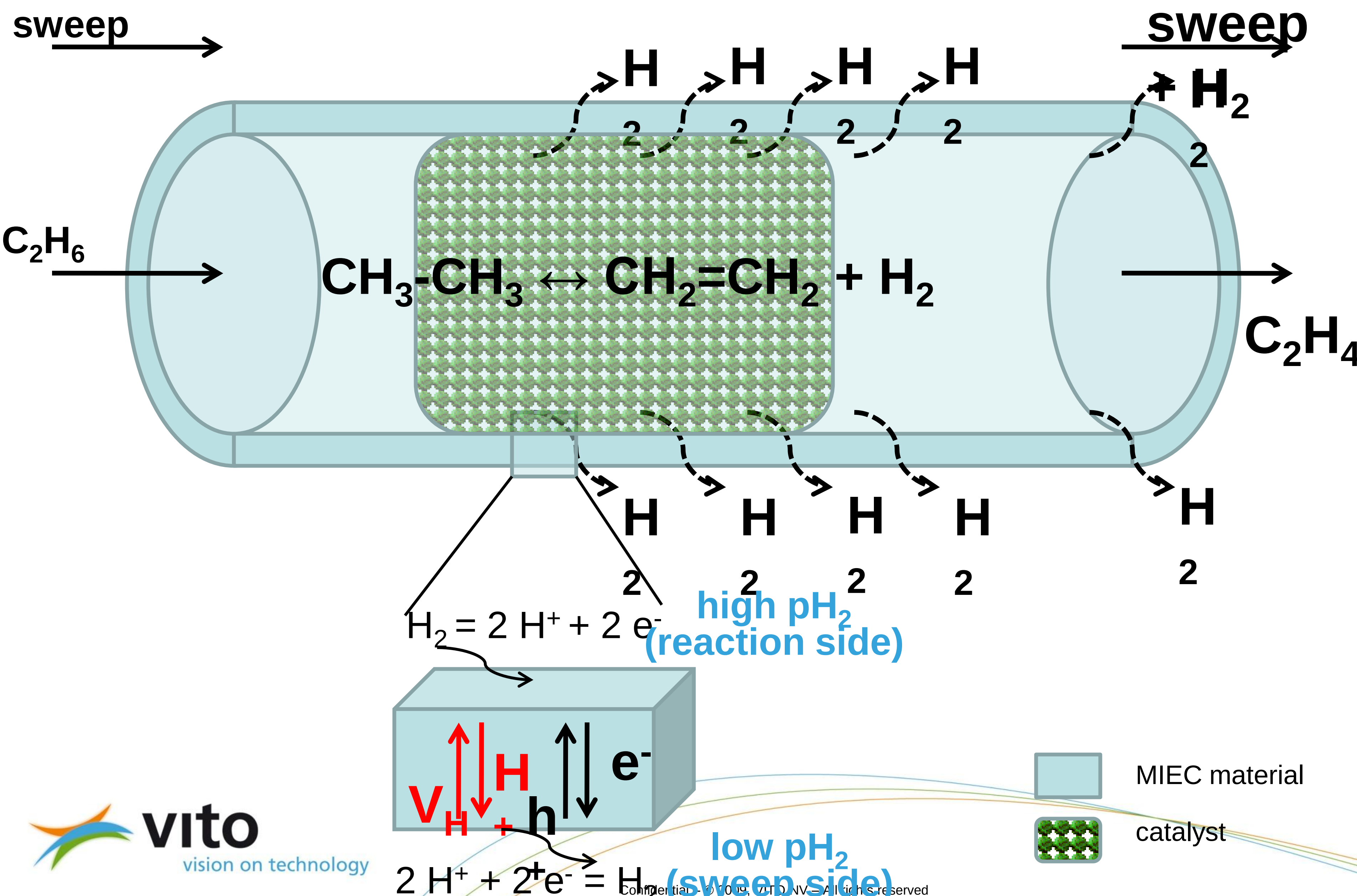
Membrane geometries

Membrane geometry	Surface/volume ratio
Flat (plate & frame)	~ 100 m^2/m^3
Tubular (d > 5mm)	100-500 m^2/m^3 (r = 5mm)
Tubular honeycomb (d = 2.5mm)	800 m^2/m^3
Capillaries (0.5 < d < 5mm)	500-4000 m^2/m^3 (r = 0.5mm)
Hollow fibres (d < 0.05mm)	4000-30000 m^2/m^3 (r = 0.05mm)

→ **interesting for large scale gas separation applications**

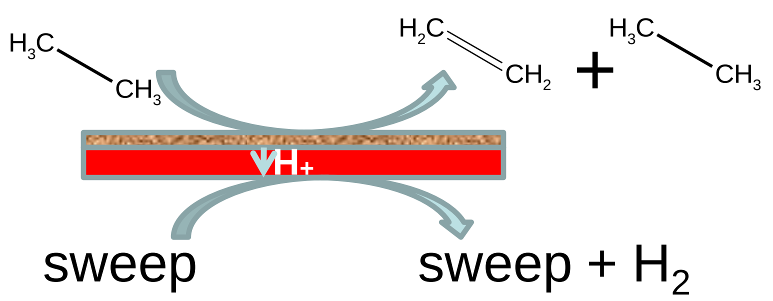
vito
vision on technology

Concept of MIEC hollow fiber membrane reactor for dehydrogenation reactions



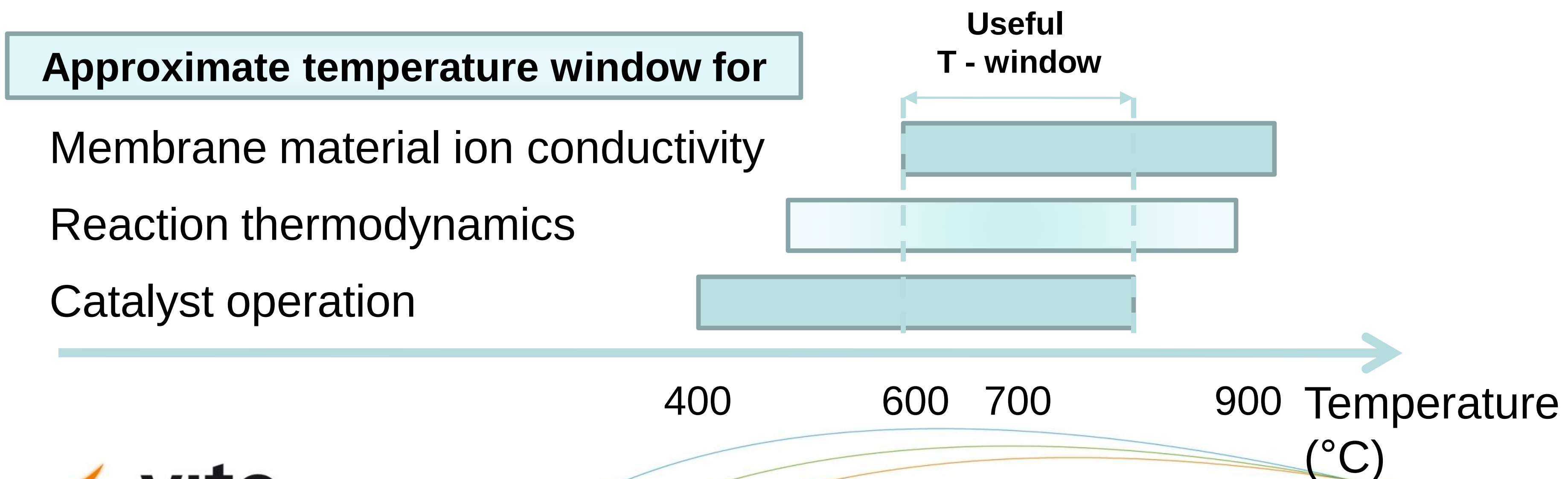
vito
vision on technology

CMR: example for dehydrogenation of ethane (2)

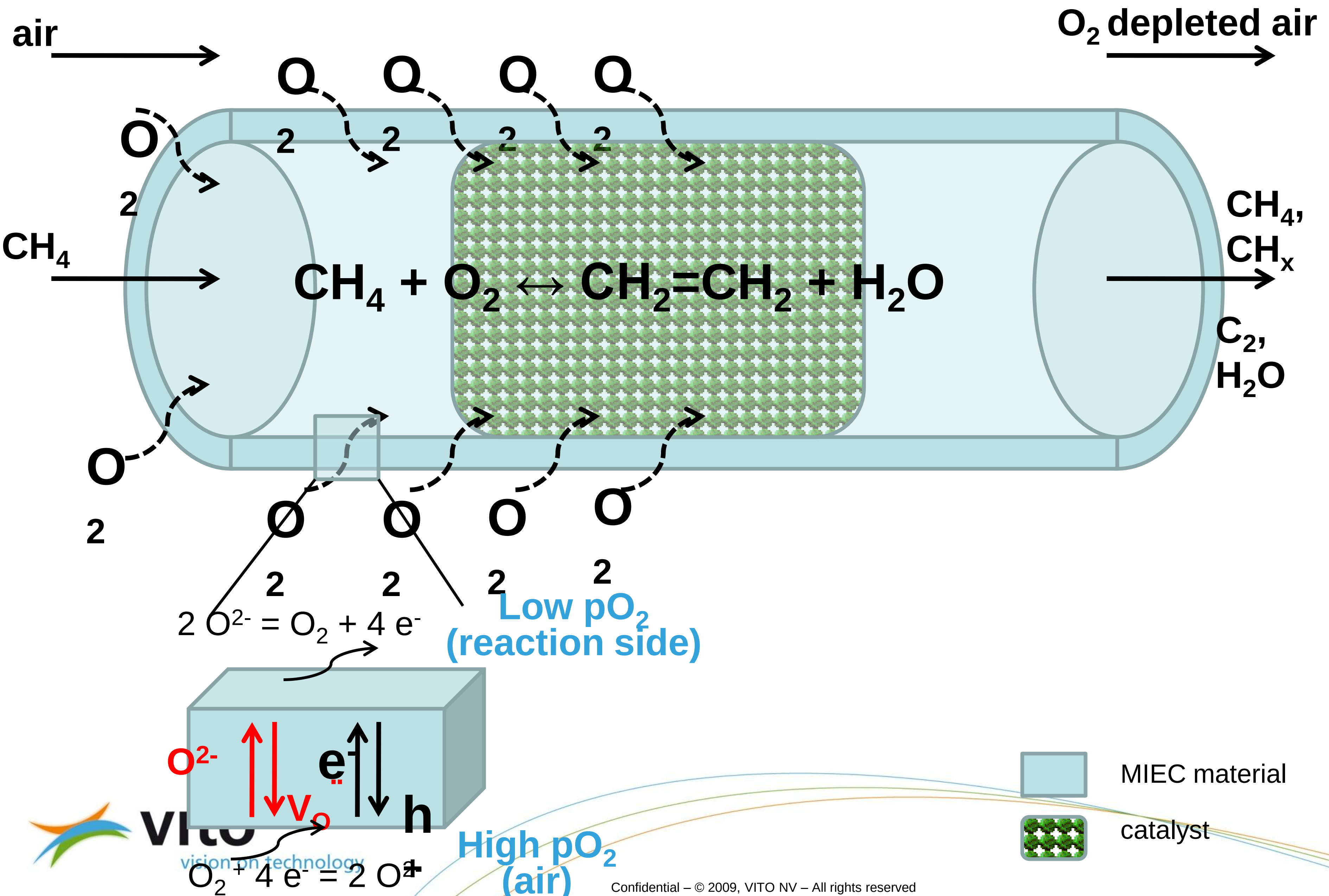


Legend

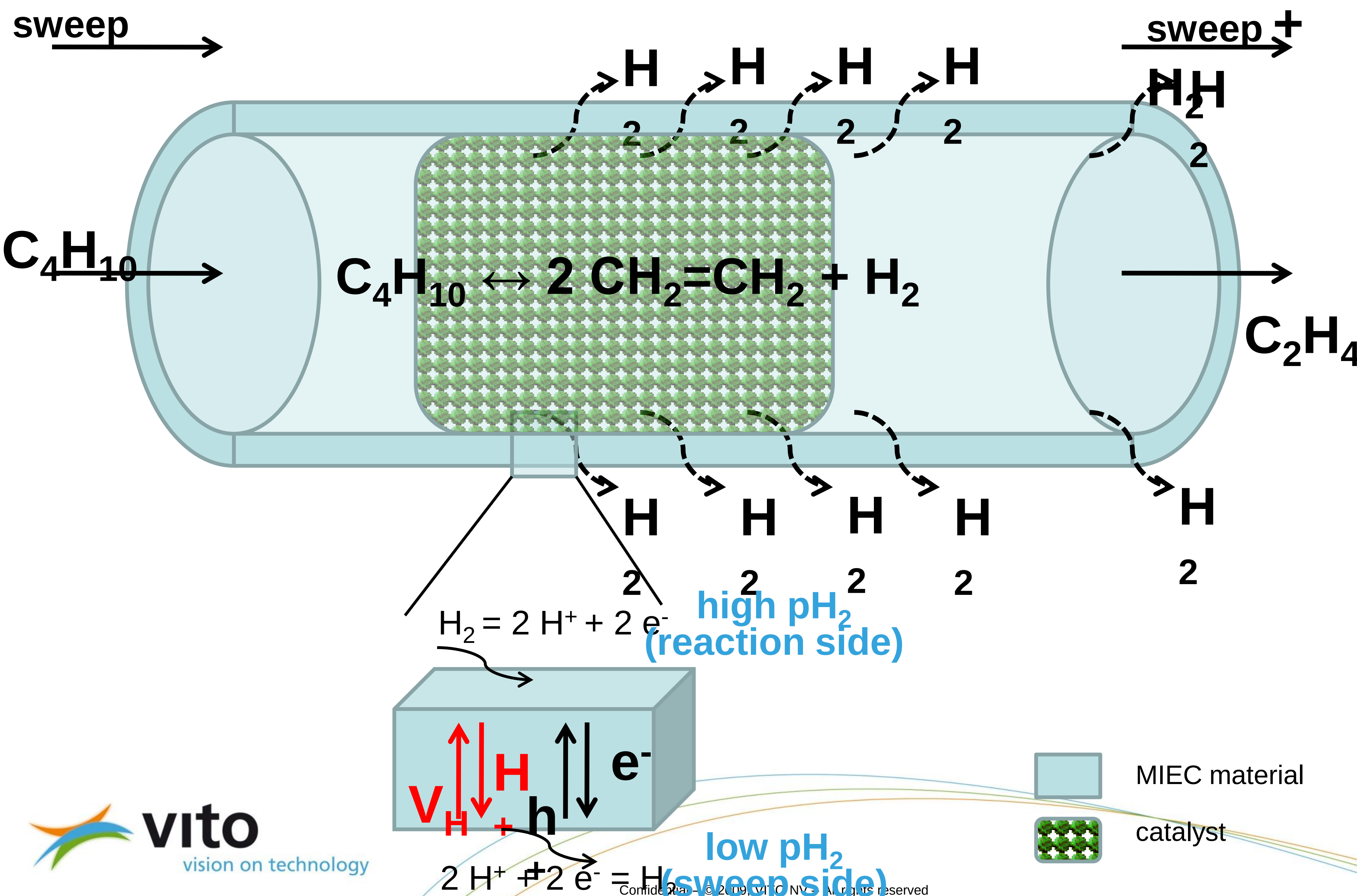
- **HF membrane wall**
- **Cat layer or bed**



Concept of MIEC hollow fiber membrane reactor for oxidative coupling of methane



Concept of MIEC hollow fiber membrane reactor for dehydrogenation/cracking reactions



OUTLINE

1. Inleiding
2. Membranen / Modules en ontwerp
3. Procesparameters en fouling
4. Overzicht waterige membraantoepassingen
5. Case-studies membranen voor waterzuiveringstoepassingen
6. Overzicht en case-studies niet-waterige membraantoepassingen
7. **Conclusies**

CONCLUSIES

- ✓ Het is technisch mogelijk om quasi elke waterkwaliteit te maken
- ✓ Goedwerkende installaties vragen echter een duidelijke kennis van ontwerp- en applicatieparameters
- ✓ Duidelijke (milieu)voordelen maken van membraantechnologie “best-beschikbare-techniek”
- ✓ Technische + economische haalbaarheid: erg gevalspecifiek !
- ✓ Aandacht voor concentraatstromen !
- ✓ Membranen geschikt voor organische solventen
- ✓ Membraanreactoren: combinatie van conversie en scheiding


WATER
Our Global Common

Meer info?

Ludo Diels
Pieter Vandezande
VITO, Scheidings- en Conversietechnologie
Boeretang 200
2400 Mol

Ludo.diels@vito.be
pieter.vandezande@vito.be