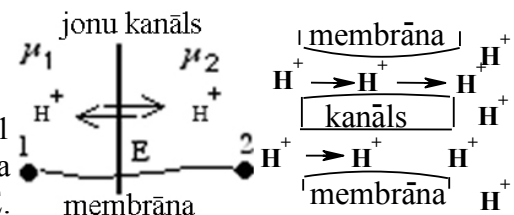


HOMEOSTĀZES koncentrācijas gradients membrānas potenciāls joniem $H^+, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, Cl^-$

Kustību leļup pa koncentrācijas gradientu $C_{labā_puse}/C_{kreisā_puse}$ vai pretī osmo molāram gradientam virza E7 klases transporta enzīmi membrānas šķērsojoši olbaltumvielu kanāli.

Viena mola ūdeņraža jona ar lādiņu $n=+1$ pārnese virzienā no kreisās puses **šūnas iekšpuses** uz labo pusi cauri membrānas jonu kanālam, veidojot **šūnas ārpusi** nātrija jona koncentrāciju ir brīvās standarta enerģijas negatīva izmaiņa $-\Delta G^\circ$ vienāda ar darbu W_{darbs} ,

$$\Delta G = G_2 - G_1$$



ko ķīmiskajā reakcijā dod viens mols H^+ pārvietojoties no punkta 1 šūnas iekšpusē uz punktu 2 šūnas ārpusi šķīdumā pie elektroda potenciāla vērtības E .

Viena mola H^+ lādiņš q ir jona lādiņš $n=+1$ reizināts ar Faradeja skaitli $F=96485$ C, respektīvi, $q = nF$, un darbs aprēķināms divos neatkarīgos veidos, kuru vērtības sakrīt $W_{darbs} = qE = nFE = -\Delta G^\circ = RT \ln K_{eq}$.

Membrānas līdzsvara konstanti var aprēķināt $K_{eq} = \frac{[H^+]_{ārpuse}}{[H^+]_{iekspuse}}$, tāpēc membrānas potenciālu var aprēķināt

$$E_{membrāna} = \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left(\frac{[H^+]_{ārpuse}}{[H^+]_{iekspuse}} \right) \text{ un redzams, ka } E=0 \text{ ja } \frac{[H^+]_{ārpuse}}{[H^+]_{iekspuse}} = 1 \text{ un ja jonu koncentrācijas abās membrānas pusēs ir vienādas } [H^+]_{ārpuse} = [H^+]_{iekspuse}.$$

Nernsta vienādojumā pāriet no naturālā (naturālais skaitlis $e=2,7\dots$) logaritma \ln uz decimālo (decimālais skaitlis 10) logaritmu \lg ar izteiksmi $\ln(a) = \ln(10) \cdot \lg(a) = 2,3\dots \cdot \lg(a)$. Temperatūra standarta apstākļos ir $T=298,15$ K un universālā gāzu konstante $R=8.3144$ J/mol/K.

$$E = \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left(\frac{[H^+]_{ārpuse}}{[H^+]_{iekspuse}} \right); \frac{\ln(10) \cdot R \cdot T}{F} = \frac{2.3 \cdot R \cdot T}{F} = 0,0591 \text{ V}; E = \frac{0.0591}{n} \cdot \lg \left(\frac{[H^+]_{ārpuse}}{[H^+]_{iekspuse}} \right), \text{ kur } n \text{ ir jona lādiņš}$$

(nātrija katjonam H^+ $n=+1$, kālija katjonam K^+ $n=+1$, hlorīda anjonam Cl^- $n=-1$, bikarbonāta anjonam HCO_3^- $n=-1$ un ūdeņraža jonam H^+ $n=+1$ utt.).

Ķīmisko potenciālu - otra pieeja membrānas potenciāla aprēķināšanai.

Mēs esam novērojuši viena mola n lādiņa jonu pārvietošanos no šūnas iekšpuses ar kopējo jonu lādiņu $q = nF$ cauri membrānas kanālam un iestājies līdzsvars, kad reaģenta kreisajā pusē un produkta labajā pusē ķīmisko potenciālu summa kļūst vienāda abās šūnas membrānu pusēs $\mu_{H^+_{iekspuse}} + nFE = \mu_{H^+_{ārpuse}}$

bet katras vielas ķīmiskais potenciāls ir: $\mu = \Delta G^\circ + RT \ln(N_A)$, kur N_A ir vielas A koncentrācija mola daļās.

ΔG° ir vielas A standarta brīvās enerģijas izmaiņa uz vienu molu veidojoties vielai no elementiem.

Ķīmiskajā līdzsvarā dotā viela nātrija katjoniem šūnas iekšpusē un šūnas membrānas otrajā pusē ir vienādi $\Delta G^\circ_{H^+_{iekspuse}} = \Delta G^\circ_{H^+_{ārpuse}}$ tāpēc starpība $\Delta G^\circ_{H^+_{ārpuse}} - \Delta G^\circ_{H^+_{iekspuse}} = 0$ ir nulle.

Aprēķinot no $\Delta G^\circ_{H^+} + RT \ln(N_{H^+_{iekspuse}}) + nFE_{membrāna} = \Delta G^\circ_{H^+} + RT \ln(N_{H^+_{ārpuse}})$ membrānas potenciālu

$E_{membrāna}$ ķīmisko potenciālu summa izteiksmē $\mu_{H^+_{iekspuse}} + nFE_{membrāna} = \mu_{H^+_{ārpuse}}$:

$$E_{membrāna} = \frac{\Delta G^\circ_{H^+} - \Delta G^\circ_{H^+}}{nF} + \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left(\frac{N_{H^+_{ārpuse}}}{N_{H^+_{iekspuse}}} \right), \text{ kur } \frac{\Delta G^\circ_{H^+} - \Delta G^\circ_{H^+}}{nF} = E_0 \text{ ir standarta potenciāls.}$$

Tā kā ir vienādi $\Delta G^\circ_{H^+_{iekspuse}} = \Delta G^\circ_{H^+_{ārpuse}}$, tad membrānas standarta potenciāls ir $E_0 = 0$

$$E_{membrāna} = \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left(\frac{N_{H^+_{ārpuse}}}{N_{H^+_{iekspuse}}} \right), \text{ jo } 0 = \frac{\Delta G^\circ_{H^+} - \Delta G^\circ_{H^+}}{nF}.$$

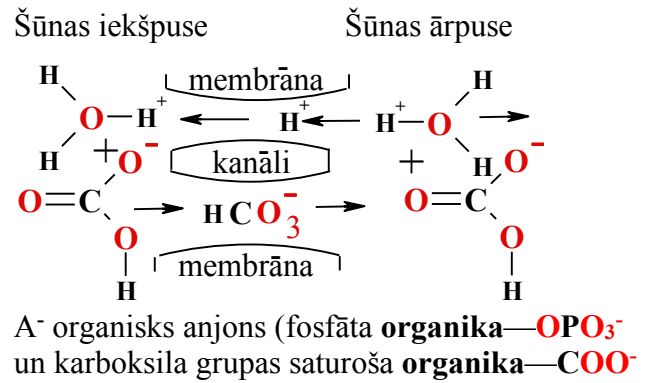
pārveidojot uz molārām koncentrācijām un uz decimālo logaritmu iegūst membrānas potenciāla izteiksmi $E_{membrāna}$ ķīmiskajam līdzsvaram:

$$H^+ \text{ iekšpusē} \xleftarrow{\text{membrānas KANĀLS}} H^+ \text{ ārpusē}; E_{membrāna} = \frac{0.0591}{n} \cdot \lg \left(\frac{N_{H^+_{ārpuse}}}{N_{H^+_{iekspuse}}} \right).$$

$$\text{Fizioloģiskā temperatūra } T= 310.15 \text{ K un } E_{membrāna} = \frac{0.06154}{n} \cdot \lg \left(\frac{N_{H^+_{ārpuse}}}{N_{H^+_{iekspuse}}} \right).$$

Tabula. Jonu koncentrācijas šūnas iekšpusē un ārpusē zīdītāju spinālā motora neironos.

Jons	Koncentrācija (mmol/L ūdens)		Līdzsvara Potenciāls (mV)
	Šūnas iekšpuse	Šūnas ārpusē	
Na ⁺	15.0	150.0	+61.54
K ⁺	150.0	5.5	-88.35
10 ⁻⁷ ·cH ⁺	14.93	4.365	-32.87
Cl ⁻	9.0	125.0	-70.32
HCO₃⁻	27.0	8	+32.51
A ⁻	122.49	43.79	+27.49



Membrānas miera potenciāls E = -70 mV.) .

Membrānas potenciālu nātrija katjoniem Na⁺ aprēķina membrānas potenciāla izteiksmē.

$$\text{Membrānas potenciāls } E = \frac{0.06154}{+1} \cdot \lg\left(\frac{150}{15}\right) = +61.54 \text{ mV};$$

Membrānas potenciālu kālija K⁺ katjoniem aprēķina membrānas potenciāla izteiksmē.

$$\text{Membrānas potenciāls } E = \frac{0.06154}{+1} \cdot \lg\left(\frac{5.5}{150}\right) = -88.35 \text{ mV};$$

Membrānas potenciālu ūdeņraža H⁺ katjoniem aprēķina membrānas potenciāla izteiksmē.

$$\text{Membrānas potenciāls } E = \frac{0.06154}{+1} \cdot \lg\left(\frac{4.365}{14.93}\right) = -32.87 \text{ mV}$$

Zīdītāju spinālā motora neironos **pH_{iekšpuse} = 6.826** ; C=14,93·10⁻⁷ M

Membrānas potenciālu hlorīda Cl⁻ anjoniem aprēķina membrānas potenciāla izteiksmē.

$$\text{Membrānas potenciāls } E = \frac{0.06154}{-1} \cdot \lg\left(\frac{125}{9}\right) = -70.32 \text{ mV};$$

Membrānas potenciālu bikarbonāta HCO₃⁻ anjoniem aprēķina membrānas potenciāla izteiksmē.

$$\text{Membrānas potenciāls } E = \frac{0.06154}{-1} \cdot \lg\left(\frac{8}{27}\right) = +32.51 \text{ mV};$$

Membrānas potenciālu organiskiem anjoniem A⁻ aprēķina membrānas potenciāla izteiksmē.

$$\text{Membrānas potenciāls } E = \frac{0.06154}{-1} \cdot \lg\left(\frac{122.49}{43.79}\right) = +27.49 \text{ mV}.$$

Tabula. Miera stāvokļa membrānas potenciāls zīdītājdzīvnieku skeleta muskuļos.¹

Jons	Koncentrācija c (mmol/L ūdenī H ₂ O)		Līdzsvara Potenciāls (mV)
	Šūnas iekšpuse	Šūnas ārpusē	
Na ⁺	12.0	145.00	+66.60
K ⁺	155.0	4.00	-97.74
10 ⁻⁵ ·cH ⁺	13.0	3.80	-32.87
Cl ⁻	3.8	120.00	-92.27
HCO₃⁻	27.0	8.00	+32.51
A ⁻	155.0	43.79	+33.78

Miera stāvokļa membrānas potenciāls E = -90 mV .

Aktīvas **Mitochondrijas** iekšpusē ir $pH = 7,36$ un ārpusē starp membrānu telpā $pH = 5$.

Bikarbonāta koncentrācija citosolā un asinīs ir $[HCO_3^-] + [CO_2] = 0,023 M$ un $[HCO_3^-] = 0,0154 M$ un Hendersona Haselbalha vienādojumā izskaitļot CO_2 koncentrāciju $[CO_2]$ mēs varam izskaitļot izteiksmē: $pH = pK + \lg([HCO_3^-]_{citosols} / [CO_2])$; $7,36 = 7,0512 + \lg([HCO_3^-]_{citosols} / [CO_2])$ un anti logaritmējot $10^{7,36-7,0512} = [HCO_3^-]_{citosols} / [CO_2] = 2,036 = 0,0154 M / [CO_2]$ kur $[CO_2] = 0,0154 M / 2,036 = 0,0076 M$ ir aprēķinātā oglekļa(IV) oksīda koncentrācija asinīs, citosolā, bet mitochondrijā, respektīvi, kuros $pH = 7,36$ $[HCO_3^-] + [CO_2] = 0,023 M + 0,02527 M = 0,05054 M$ un

$$[HCO_3^-] = 0,033892 M; [CO_2] = 0,05054 - 0,033892 = 0,01665 M$$

$10^{7,36-7,0512} = [HCO_3^-]_{Mitohon} / [CO_2] = 2,36 = [HCO_3^-]_{Mitohon} / 0,01665 M$ **Mitochondrijas** iekšpusē

Bikarbonāta koncentrācija ir reizes 2,2 = $[HCO_3^-]_{Mitohon} / [HCO_3^-] = 0,0338919 M / 0,0154 M$ lielāka.

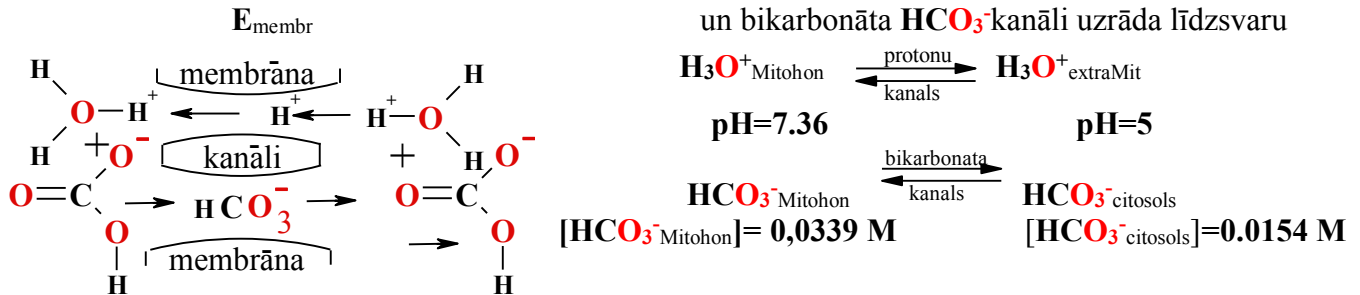
Cilvēka ķermeņa temperatūra $t = 37^\circ C$; $T = 310,15^\circ K$. $0,02754 M + 0,023 M = 0,05054 = [HCO_3^-] + [CO_2]$

$10^{7,36-7,0512} = [HCO_3^-]_{Mitohon} / [CO_2] = 2,036 = [HCO_3^-]_{Mitohon} = x / (0,05054 - x)$; $pH = 7,36$

$x = 2,036 * (0,05054 - x) = 2,036 * 0,05054 - 2,036 * x = x$; $x(1 + 2,036) = 2,036 * 0,05054$; tā tad $x = [HCO_3^-]_{Mitohon}$

$[HCO_3^-]_{Mitohon} = x = 2,036 * 0,05054 / (1 + 2,036) = 0,10289944 / 3,036 = 0,0338919 M = [HCO_3^-]_{Mitohon} = x$

Membrānas potenciāls Ūdeņražakatjoniem H_3O^+ membrānas protonu H^+ kanālos un bikarbonāta HCO_3^- kanāli uzrāda līdzsvaru



protona $E_{H^+_{membr}} = P \cdot \lg(10^{-pH_{extraMit}} / 10^{-pH_{Mitohon}}) = 0,06154 \cdot \lg(10^{-5} / 10^{-7,36}) = P \cdot \lg(10^{2,36}) = 0,14523 V$.

aktuālais membrānas potenciāls un bikarbonāta anjonulīdzsvars $HCO_3^-_{Mitohon} \rightleftharpoons HCO_3^-_{citosols}$ ir

$E_{HCO_3^-_{Mitohon}} = -P \cdot \lg([HCO_3^-]_{citosols} / [HCO_3^-]_{Mitohon}) = -0,06154 \cdot \lg(0,0154 / 0,0338919) = 0,0210821 V$,

kur $P = \frac{\ln(10) \cdot R \cdot T}{F} = \frac{2,3 \cdot 8,3144 (J / mol / K) \cdot 310,15^\circ K}{96485 C} = 0,06154 V$, cilvēka ķermeņa $t = 37^\circ C$; $T = 310,15^\circ K$.

Ūdeņraža un bikarbonāta $0,14523 V + 0,0210821 V = E_{membr} = 0,1663 V$ ir membrānas potenciālu summa.

Elektriskā $\Delta G = -E_{membr} \cdot F \cdot n(\text{jona}_{lādiņš} \pm 1) = -0,1663 \cdot 96485 \cdot (1) = -16,045 \text{ kJ/mol}$ brīvās enerģijas izmaiņa.

$\Delta G_{H^+} = -RT \ln([H_3O^+]_{extraMit} / [H_3O^+]_{Mitohon}) = -RT \ln(10^{-5} / 10^{-7,36}) = -8,3144 \cdot 310,15 \cdot \ln(10^{2,36}) = -14,013 \text{ kJ/mol}$

brīvās enerģijas izmaiņa koncentrācijas gradienta virzītai cauri protonu H^+ kanālam šķērsojot lipīdu dubultslāņa membrānu. $\Delta G = \Delta G_{membr} + \Delta G_{kanāls} = -16,0454 \text{ kJ/mol} - 14,013 \text{ kJ/mol} = -30,05846 \text{ kJ/mol}$ vienam molam protonu H^+ virzīta ATPāze veic darbu 19 reizes efektīvāk par H_3O^+ , jo viena mola protona H^+ masa **viens grams** virzienā no ekstra (ārpus) membrānas telpas ($H_3O^+_{extraMit}$) uz mitochondrijas matricas (iekšpusē) telpu ($H_3O^+_{Mitohon}$).

Protonu H^+ koncentrācijas gradienta $\Delta G = \Delta G_{membr} + \Delta G_{kanāls} = -30,058 \text{ kJ/mol}$ summārā elektroķīmiskā brīvās enerģijas izmaiņa virza ATPāzes nano dzinēju sintezēt ATP^4- (adenozīna trifosfāta) molekulas.

Abu brīvo enerģiju negatīvās izmaiņas summa ir $4 \cdot -30,058 \text{ kJ/mol} = -120,232 \text{ kJ/mol}$, patērējot četrus protonus $4 H^+$, virza ATPāzes nano rotoru sintezēt vienu ATP^4- molekulu. Viena mola ATP^4- producēšanā 503 grammi patērējas 4 grammi kā četri moli protonu. Brīvās enerģijas izmaiņa ir $\Delta G = -120 \text{ kJ/mol}$. Makro erģiskā ATP^4- saite hidrolizē eritrocītos atbrīvo brīvo enerģiju $\Delta G = -55,16 \text{ kJ/mol}$ (cilvēka eritrocītā homeostāzē 22. lapa <http://aris.gusc.lv/BioThermodynamics/BioThermodynamicsL.pdf>). ATP^4- akumulētā ķīmiskā brīvā enerģijas lietderība ir 45,9% ($-55,16 \text{ kJ/mol}$) no standarta apstākļos teorētiskā 100%- $120,2 \text{ kJ/mol}$. Oksidatīvā fosforilēšana no četrus protonu pārneses enerģijas patērē vismaz 54,1 % ATP^4- rotora berzes siltuma producēšanai un ATP^4- kustībai citosolā ūdens vidē veidojot koncentrācijas gradientu membrānas šķērsošanai kā brīvās enerģijas avotu, lai virzītu ATP^4- molekulu transportu.

Acīm redzami cita lādēta katjona molekula, piemēram, Na^+ katjons 23 reizes smagāks vai kālija katjons K^+ 39 reizes smagāks un to relatīvā lietderība ar vienu gramu masu pārvietošanu ir 23 reizes vai 39 reizes mazāk efektīva ATP^4- sintēzei salīdzinot ar lādēta protona H^+ pārvietošanu cauri membrānas kanāliem.

Dzīvie organismi evolūcijā ieguvuši visefektīvāko ar mazu: **izmēru, masu** un lielāko iespējamo **vienas vienības pozitīva lādiņa** protonu H^+ .