



## Tečaj 2

# EMS in zdravje

**Tadej Kotnik in Damijan Miklavčič**

*Laboratorij za biokibernetiko*

*Fakulteta za elektrotehniko*

*Univerza v Ljubljani*

**Peter Gajšek**

*Inštitut za neionizirna sevanja*

*Ljubljana*



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za *elektrotehniko*  
Laboratorij za *biokibernetiko*



## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Kazalo

1. poglavje: Človeško telo v električnem polju
2. poglavje: Človeško telo v magnetnem polju
3. poglavje: Celica v električnem polju
4. poglavje: Celica v magnetnem polju
5. poglavje: Pregled učinkov EMS po frekvencah
6. poglavje: Električna stimulacija živcev in mišic
7. poglavje: Termični učinki
8. poglavje: Vizualni učinki (fosfeni)
9. poglavje: Slušni učinki
10. poglavje: Magnetohidrodinamični učinki
11. poglavje: Elektroporacija celične membrane

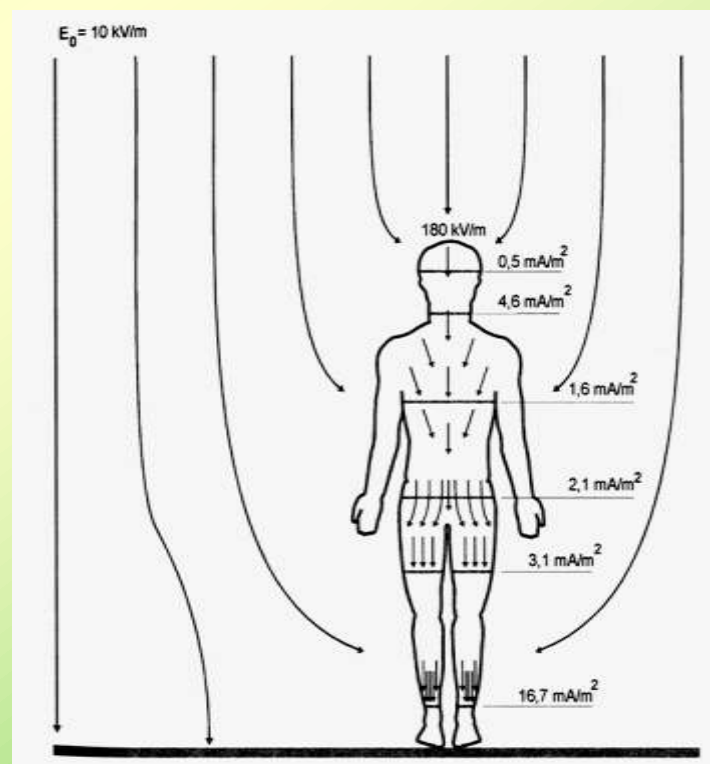


## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 1/11: Človeško telo v električnem polju

V 5. poglavju 1. tečaja smo spoznali, da prične v snoveh, ki vsebujejo proste naboje (prevodnikih), ob izpostavitvi električnemu polju teči električni tok. Človeško telo je zgrajeno iz organov, ti pa iz različnih bioloških tkiv, ki so vsa do neke mere električno prevodna.

Zato v telesu ob izpostavitvi električnemu polju vselej pride do nastanka električnih tokov. Njihova velikost, smer in trajanje so odvisni od jakosti in smeri zunanje polja (torej od vektorja  $E$ ) ter prevodnosti in geometrije posameznih tkiv. Tako je gostota električnega toka v splošnem večja v bolj prevodnih tkivih, poviša pa se tudi v zoženih delih telesa. Slika na desni prikazuje opisane razmere na primeru človeka pod visokonapetostnim daljnovodom, ki ustvarja zunanje električno polje z jakostjo  $10 \text{ kV/m}$ , usmerjeno navpično v smeri navzdol. V tej smeri tečejo tudi tokovi v telesu, gostota električnega toka pa je povišana v vratu in še bolj v gležnjih, kjer je zoženje površine preseka telesa najbolj izrazito. Jakost električnega polja je najvišja tik nad glavo, znotraj telesa pa je precej nižja kot zunaj njega.

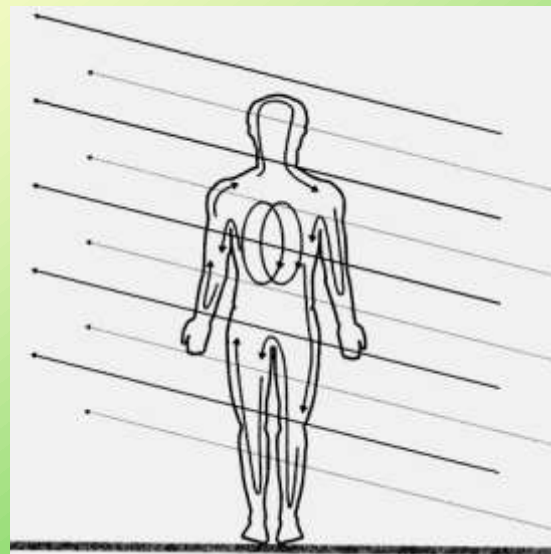
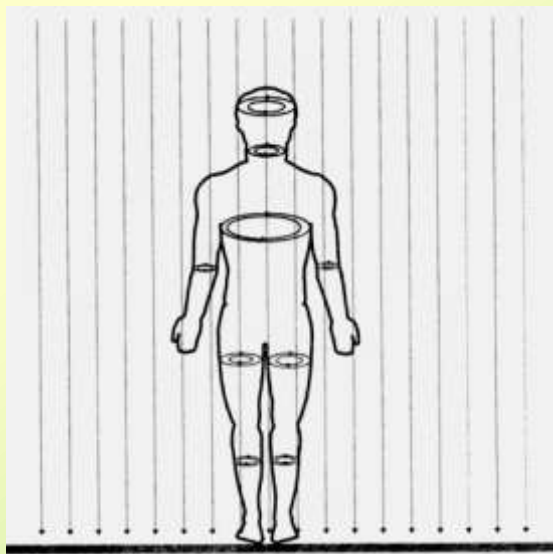




## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 2/11: Človeško telo v magnetnem polju

Magnetna permeabilnost bioloških tkiv je zelo podobna magnetni permeabilnosti praznega prostora. Ker je gostota magnetnega pretoka (t.j. velikost vektorja  $B$ ) sorazmerna tej količini, se magnetno polje ob vstopu iz praznega prostora v telo skorajda ne spremeni; pravimo, da je telo za magnetno polje prosojno. Zato magnetno polje v telesu ne povzroči znatnega namagnetjenja (magnetne polarizacije). Kljub temu pa časovno spremenljiva magnetna polja učinkujejo na telo, saj so vir krožnega električnega polja (glej 1. tečaj, 3. poglavje). Ker so tkiva električno prevodna, to privede do nastanka **induciranih tokov** – krožnih električnih tokov, pravokotnih na smer vektorja  $B$ . Podoben učinek ima tudi gibanje telesa po nehomogenem statičnem magnetnem polju. Kot vsak električni tok so tudi krožni tokovi, ki nastanejo zaradi magnetnih polj, odvisni od prevodnosti in geometrije tkiv in telesa. Enaki so tudi njihovi učinki – lahko povzročijo vzdraženje živcev in mišic ali katerega od drugih učinkov, ki jih bomo obravnavali v nadaljevanju.

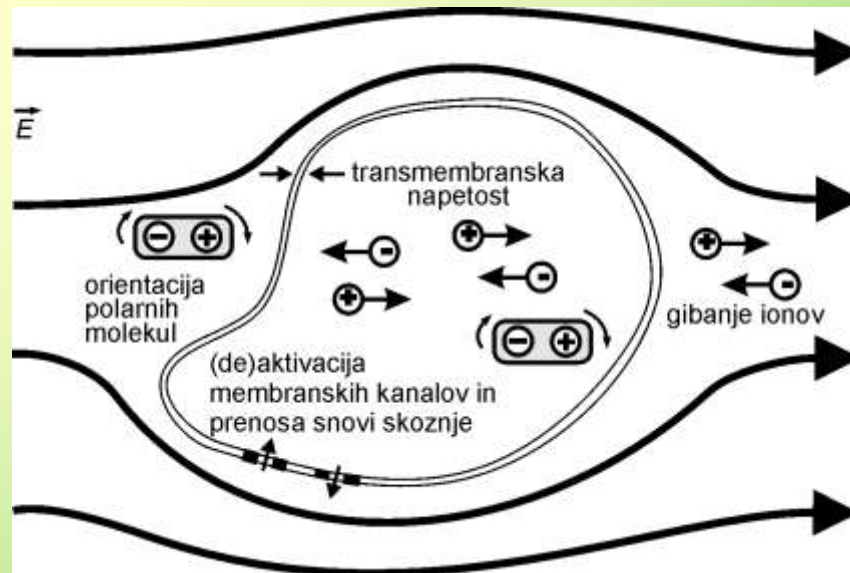




## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 3/11: Celica v električnem polju

Tkivo dejansko ni snov s homogenimi električnimi lastnostmi, temveč je sestavljeno iz celic. Zato je pri obravnavi učinkov na mikroskopskem nivoju potrebno upoštevati zgradbo biološke celice. Ta je obdana z membrano, ki je zgrajena pretežno iz polarnih maščob (lipidov) in ima zelo nizko električno prevodnost. Notranja zgradba celice pa je sicer zelo pestra, a na učinke električnega polja vpliva predvsem njena poglobitna sestavina – elektrolitska raztopina (citosol) s sorazmerno visoko prevodnostjo. Izpostavitve celice zunanjemu električnemu polju tako privede do električnega toka v citosolu, a ker je membrana za tok skoraj neprepustna, se nosilci naboja (ioni) naberejo ob membrani, kar se navzven kaže kot polarizacija celice, na membrani pa izmerimo električno napetost. Napetost na membrani lahko vpliva tudi na določene beljakovinske molekule v membrani, ki omogočajo selektiven transport posameznih ionov in molekul skozi membrano. Električno polje povzroči tudi orientacijo polarnih molekul ter gibanje ionov v okolici celice, kar se kaže kot električni tok, ki teče okoli (mimo) celice. Slika na desni povzema naštetе učinke električnega polja na celico ter njeno okolico.

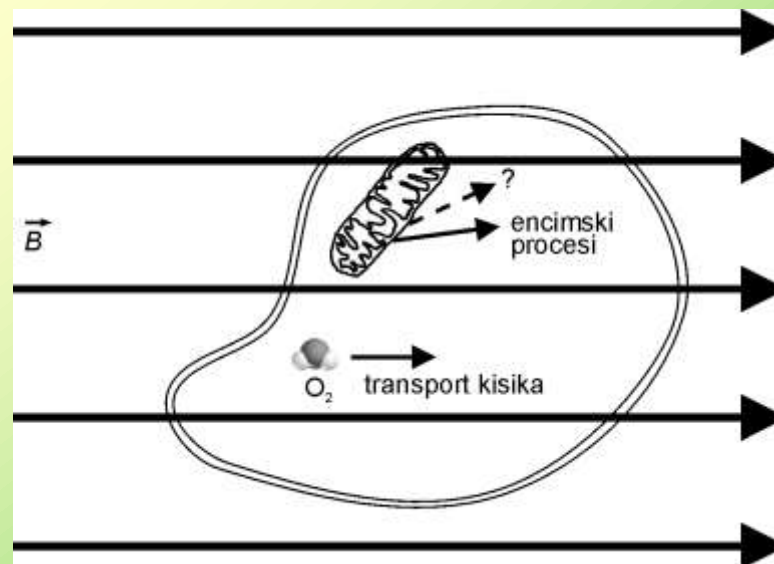




## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 4/11: Celica v magnetnem polju

Podobno kot tkivo in telo v celoti je tudi celica nemagnetna in prosojna za magnetno polje. Izjemo predstavljajo molekule, ki vsebujejo železo: hemoglobin, ki sodeluje pri transportu kisika po telesu in ga najdemo v rdečih krvnih celicah (eritrocitih), ter še nekaj deset različnih encimov, večina katerih prav tako sodeluje v celični presnovi kisika. Magnetno polje lahko tako vpliva na transport in presnovo kisika ter še nekatere encimske procese, ki potekajo v celici. Načeloma bi tudi na celičnem nivoju učinki lahko nastali tudi preko induciranih električnih tokov, a o tem, ali imajo ti tokovi lahko kak učinek tudi na nivoju posamezne celice, še vedno poteka intenzivna znanstvena razprava. Slika na desni povzema našete dokazane učinke magnetnega polja na celico.





## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 5/11: Pregled učinkov EMS po frekvencah

V 1. tečaju smo že spoznali, da je narava interakcij med EMS in telesi, ki so jim izpostavljena, odvisna od razmerja med velikostjo telesa ( $L$ ) in valovno dolžino EMS ( $\lambda$ ), ki deluje na telo. Pri osebi višine  $L = 1.70$  m je v praznem prostoru  $\lambda = L$  pri EMS s frekvenco

$$v_0 = c_0/\lambda \approx 176 \text{ MHz}$$

Interakcije med EMS in človeškim telesom so torej po svoji naravi odvisne od tega, ali je frekvenca EMS znatno nižja, podobnega velikostnega razreda, ali znatno višja od te vrednosti. V splošnem jih lahko povzamemo takole:

- Pri frekvencah do 1 MHz prevladujejo učinki, ki temeljijo na gibanju nosilcev naboja (ionov). Na makroskopskem nivoju to privede do **električnih tokov v telesu** in **prerazporejanja nabojev na površini telesa**, na mikroskopskem pa do **naelektritve celičnih membran** (membranske napetosti). Ti učinki lahko povzročijo **vzdraženje živcev in mišic**, pri visokih jakostih polja pa tudi **ohmsko segrevanje** in **elektroporacijo celične membrane**.
- Pri frekvencah med 1 MHz in 1 THz prevladujejo učinki, ki jih obravnavamo s teorijo mikrovalovnih polj, predvsem **dielektrično segrevanje**.
- Pri frekvencah nad 1 THz se EMS obnašajo kot plaz delcev: frekvence med 400 in 800 THz **stimulirajo očesno mrežnico** in jih zaznavamo kot vidno svetlobo, še višje frekvence (ultravijolična svetloba, rentgensko in gama sevanje) lahko **snov ionizirajo** in s tem nepovratno poškodujejo, pri visokih jakostih polja pa pride tudi do **optičnega segrevanja**.



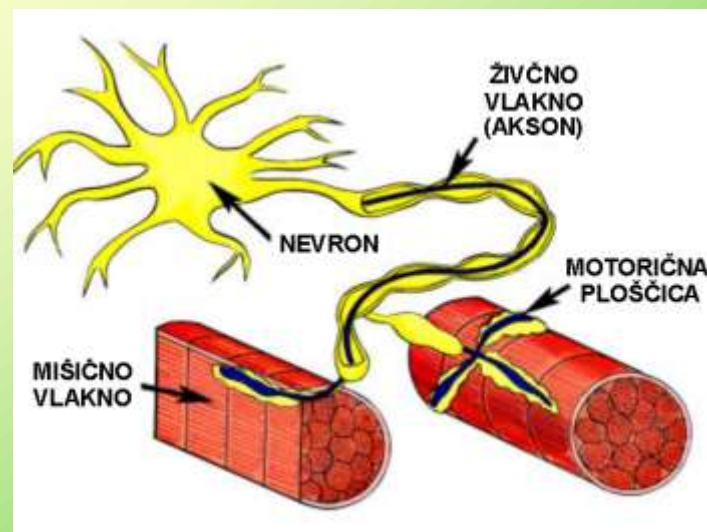
## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 6/11: Električna stimulacija živcev in mišic

Električno polje, ki znotraj telesa presega jakost  $6 \text{ V/m}$  dlje kot  $100\text{-}200 \mu\text{s}$ , lahko pri najdaljših živčnih celicah (nevronih) spremeni membransko napetost za  $15\text{-}20 \text{ mV}$ , aktivira napetostno odvisne kanale in sproži depolarizacijo membrane. Učinek je podoben običajnemu prevajanju živčnih signalov, le da je naravno vzdraženje nevrona posledica prevajanja signala z drugega nevrona, tukaj pa pride do vzdraženja zaradi izpostavitve električnemu polju – **električne stimulacije živca**. Če vzdraženi nevron oživčuje mišico, se živčni signal preko t.i. motorične ploščice prenese na mišična vlakna in povzroči vzdraženje (skrčenje) te mišice – **posredno električno stimulacijo mišice** (glej sliko). Pri poljih, ki znotraj telesa presežejo  $6 \text{ V/m}$  in trajajo več kot  $1 \text{ ms}$ , lahko pride tudi do **neposredne stimulacije skeletnih mišic**. Nad  $12 \text{ V/m}$  se **vzdraži** tudi **srce**, kar lahko povzroči njegov zastoj.

V 2. poglavju smo spoznali, da zunanje električno polje ob vstopu v telo močno oslabi, zato do zgoraj opisanih učinkov običajno prihaja le ob fizičnem stiku z virom polja – ko nas "strese" električni tok.

Opisani učinki so lahko tudi koristni. Z **defibrilatorjem** vzdražimo srce in tako odpravimo njegov zastoj, s **funkcionalno električno stimulacijo** skeletnih mišic pa omogočimo ponovno uporabo teh mišic osebam s poškodbami živcev, predvsem hrbtenjače.





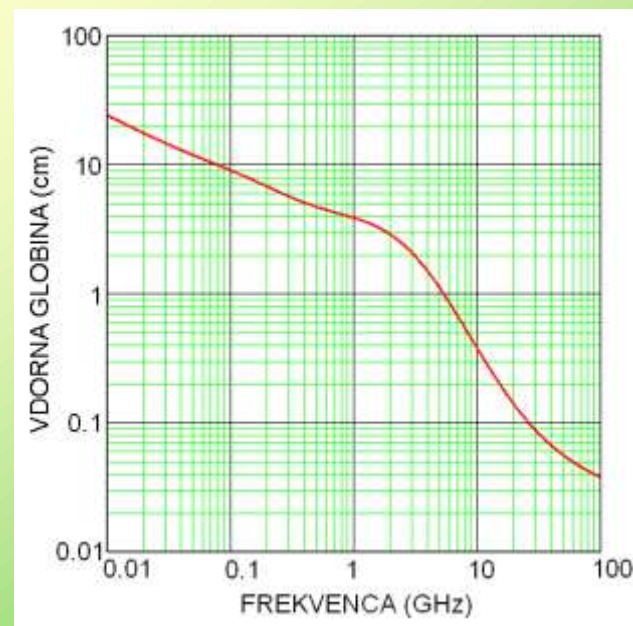
## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 7/11: Termični učinki

Termični učinki so najbolj raziskani in znanstveno utemeljeni med tistimi interakcijami EMS s telesom, do katerih pride brez neposrednega kontakta z virom polja. **Segrevanje tkiv** je posledica absorpcije energije – njenega prenosa s polja na snov, izrazitost tega učinka pa merimo s t.i. stopnjo specifične absorpcije (SAR), ki smo jo opisali v 6. poglavju 1. tečaja.

Pri enaki jakosti (amplitudi) el. polja se SAR povečuje z višanjem frekvence, kar pomeni, da pri višji frekvenci enak SAR ustvarimo z nižjo jakostjo polja. SAR višine 1 W/kg, ki v eni uri poviša temperaturo tkiva za ca. 1°C, tako pri frekvenci 1 kHz povzročimo s poljem, katerega jakost v telesu znaša 45 V/m, pri 100 MHz je za to potrebnih 35 V/m, pri 1 GHz pa 27 V/m. Vrednosti SAR, ki privedejo do povišanja temperature v telesu za več kot 1°C, lahko povzročijo trajne poškodbe tkiv, vključno z opeklinami. V zdravstvu pa ta učinek uporabljamo npr. pri hipertermiji tumorjev.

EMS ob prodiranju skozi snov postopoma slabi; razdalji, pri kateri jakost el. polja pade za tretjino, pravimo **vdorna globina**. Nad 100 MHz prične vdorna globina z višanjem frekvence hitro padati: pri 2.5 GHz znaša 2 cm, pri 10 GHz pa le še 4 mm. Zato se EMS s frekvenco nad 1 GHz skoraj povsem absorbirajo v zunanji sloji telesa.





## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 8/11: Vizualni učinki (fosfeni)

Električna stimulacija živca, ki smo jo opisali v 6. poglavju, je posledica vzdraženja nevrona zaradi aktivacije napetostno krmiljenih kanalov v njegovi membrani. Za takšno stimulacijo mora sprememba napetosti na membrani nevrona znašati vsaj 15-20 mV, saj šele tolikšna sprememba vpliva na delovanje teh kanalov in s tem nastanek živčnega signala. Proces prenosa živčnega signala z enega nevrona na drugega, ki poteka prek sproščanja posebnih molekul (nevrottransmiterjev) iz živčnih končičev (sinaps), pa je v nekaterih primerih znatno bolj občutljiv na lokalno vrednost membranske napetosti.

Med najbolj občutljivimi so sinapse v očesni mrežnici, na delovanje katerih lahko vplivajo že električna polja, katerih jakost znotraj telesa znaša le 50-80 mV/m in povzroči spremembo membranske napetosti v sinapsah nevronov za le nekaj sto  $\mu$ V. Takšno stimulacijo mrežnice zaznamo kot **fosfene** – svetlikanje, podobno tistemu ob močnem mencanju oči.

Posredno, prek inducirane električnega polja oziroma električnega toka (glej poglavje 2), lahko opisani učinek povzroči tudi magnetno polje. Glede na to, ali fosfeni nastanejo ob izpostavitvi zunanjemu električnemu ali magnetnemu polju, jih v literaturi včasih delijo na **elektrofosfene** in **magnetofosfene**.



## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 9/11: Slušni učinki

Učinki visokofrekvenčnih EMS, ki jih tipično uvrščamo med termične, so posledica dviga temperature; če je ta dovolj izrazit, pride do poškodb celic in tkiv. Poznamo pa tudi učinke, ki nastopijo, če pride do dviga temperature v zelo kratkem času, pa čeprav je ta dvig premajhen, da bi predstavljal pomembno segretje.

Eden najpomembnejših učinkov, ki nastopijo, tudi če je porast temperature majhen, a zelo hiter, je t.i. **mikrovalovni slušni učinek**. Pulzirajoča EMS dovolj visoke jakosti v frekvenčnem območju med nekaj sto MHz in nekaj GHz ob prehodu skozi lobanjo povzročijo sicer izredno majhno, a hitro termoelastično razširitev, ki se kot tlačni val seli po kostnem tkivu do notranjosti ušesa, kjer jo oseba zazna kot šumeč zvok. Odvisno od trajanja posameznega pulza ter števila in frekvence ponavljanja pulzov EMS osebe ta zvok opisujejo kot pokanje (pri posameznem pulzu) oziroma brenčanje, brnjenje ali cvrčanje (pri ponavljajočih se pulzih) – lahko bi rekli, da “slišimo mikrovalove”.

Vrednost SAR, nad katero pri človeku pride do opisanega učinka, znaša okoli 100 W/kg. Od naprav, ki nas obdajajo v vsakdanjem življenju, bi lahko ta pojav načeloma ustvarile le mikrovalovne pečice; pri EMS frekvence 2.45 GHz, ki ga te ustvarjajo, bi lahko mikrovalovni slušni učinek nastal, če bi električno polje v glavi preseglo 300 V/m. Ker pa so mikrovalovne pečice zgrajene tako, da notranjega EMS praktično ne prepuščajo v okolico, tudi v njihovi bližini do tega učinka ne more priti.



## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 10/11: Magnetohidrodinamični učinki

Izredno močna magnetna polja (nad 1.5 T) lahko v telesu povzročijo nezanemarljive sile na gibajoče se ione, učinek pa je najbolj izrazit, če je smer gibanja ionov pravokotna na vektor gostote magnetnega polja. Pojavom, ki nastanejo na ta način, pravimo **magnetohidrodinamični učinki**.

Če je tako močnemu magnetnemu polju izpostavljena glava, lahko oseba dobi občutek nenavadnega okusa v ustih ali vrtoglavico. Ta učinek je še pogostejši pri hitrem gibanju glave skozi takšno polje, npr. pri kimanju z glavo v tuljavi naprave za magnetno resonančno slikanje.

Močna magnetna polja lahko vplivajo tudi na pretok prevodnih tekočin, predvsem krvi. Učinek tudi v najmočnejših magnetnih poljih, ki jih znamo danes ustvariti, ni velik, je pa merljiv. Če telo izpostavimo magnetnemu polju, v katerem se gostota magnetnega pretoka spreminja s hitrostjo 5 T/s, se bo krvni tlak tako spremenil za približno 1%. Raziskave kažejo, da tako majhne spremembe krvnega tlaka nimajo zaznavnega vpliva na zdravje in delovanje človeškega telesa nasploh.



## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 11/11: Elektroporacija celične membrane (stran 1 od 2)

Če celico izpostavimo kratkotrajnim pulzom (od nekaj ns do nekaj ms) električnega polja zelo visoke jakosti (od nekaj sto do nekaj deset tisoč V/cm), pride do nastanka prepustnih struktur v celični membrani in s tem do izrazitega povečanja njene prepustnosti za snovi iz okolice. Ta pojav imenujemo **elektroporacija** oz. **elektropermeabilizacija**. Če pulzi niso predolgi, njihova jakost pa ni previsoka, je elektroporacija **reverzibilna**, kar pomeni, da se membrana celice najkasneje v nekaj minutah vrne v prvotno stanje, celica pa še naprej izvaja vse življenjsko pomembne funkcije. V nasprotnem primeru pa je učinek **ireverzibilen** in celica odmre.

V naravi lahko do elektroporacije pride le ob udaru nevihtne strele ali neposrednem stiku z virom visoke napetosti. V medicini in biotehnologiji pa lahko z umetno ustvarjeno elektroporacijo v celice vnašamo molekule, ki sicer ne prehajajo skozi membrano. Med takšne snovi sodi vrsta kemoterapevtikov, pa tudi molekule DNA – nosilke naših dednih informacij. Kombinacija elektroporacije s takšnimi kemoterapevtiki (**elektrokemoterapija**) znatno poveča njihovo učinkovitost, elektroporacija z DNA (**elektrogenska transfekcija**) pa omogoča vnos genov s stabilnim izražanjem, kar predstavlja varnejšo alternativo transfekciji z uporabo virusov.



## Tečaj 2: EMS in zdravje

### Poglavje 11/11: Elektroporacija celične membrane (stran 2 od 2)

Slika na desni prikazuje pretok kalcijevih ionov ( $\text{Ca}^{2+}$ ) v celice humanega karcinoma (HeLa) ob izpostavitvi električnim pulzom trajanja 1 ms in jakosti električnega polja med 200 V/cm in 600 V/cm. Ioni vstopajo le v elektroporirane celice, zaznavamo pa jih s fluorescentnim barvilom (Fura-2 AM), ki je aktivno le v notranjosti celice. Z višanjem jakosti polja se povečuje tako delež elektroporiranih celic kot vnos kalcija vanje.

