



UNIVERSITY OF TARTU



Energia kogumise ja salvestamise elektrokeemilised tehnoloogiad

Enn Lust,

Alar Jänes, Ann Laheäär, Roland Väli, Heisi Kurig, Anu Adamson, Rasmus Palm, Thomas Thomberg, Annabel Olgo, Ove korjus, Maarja Paalo ja teised kaastöötajad

TÜ füüsikalise keemia professor

TÜ keemia instituudi direktor

Eesti Teaduste Akadeemia liige energiatehnoloogiate alal

EASAC Energy Steering Committee liige

Eesti Vesinikutehnoloogiate Ühing

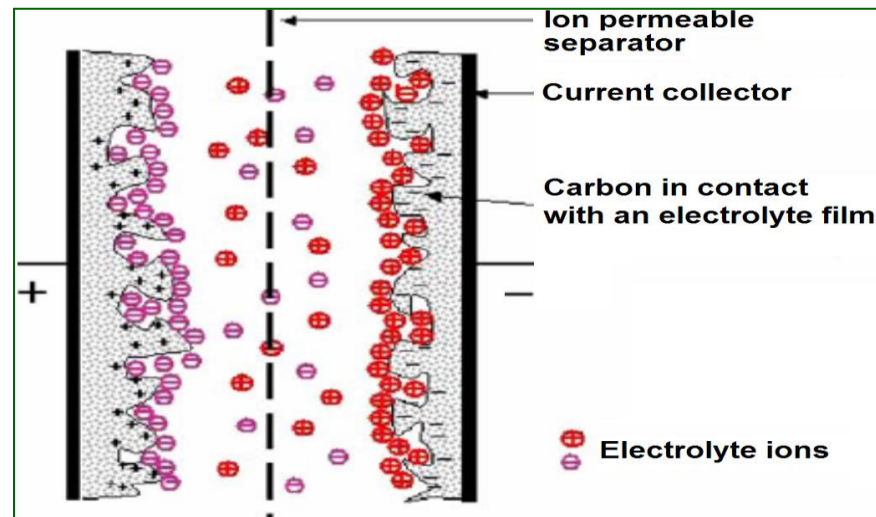
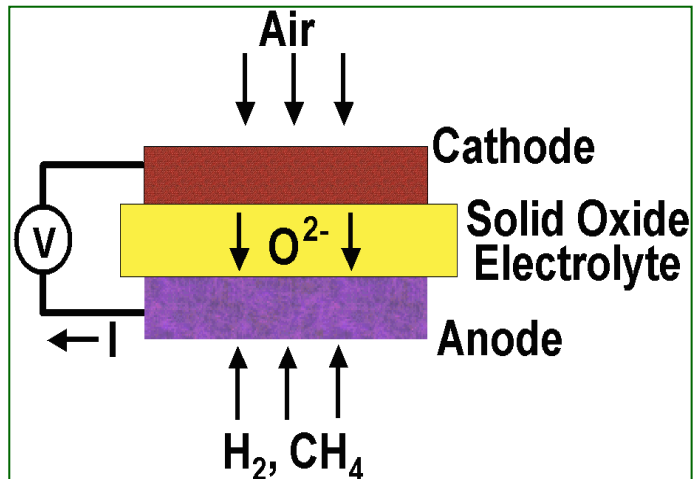
enn.lust@ut.ee

Keemia Instituut, Tartu Ülikool



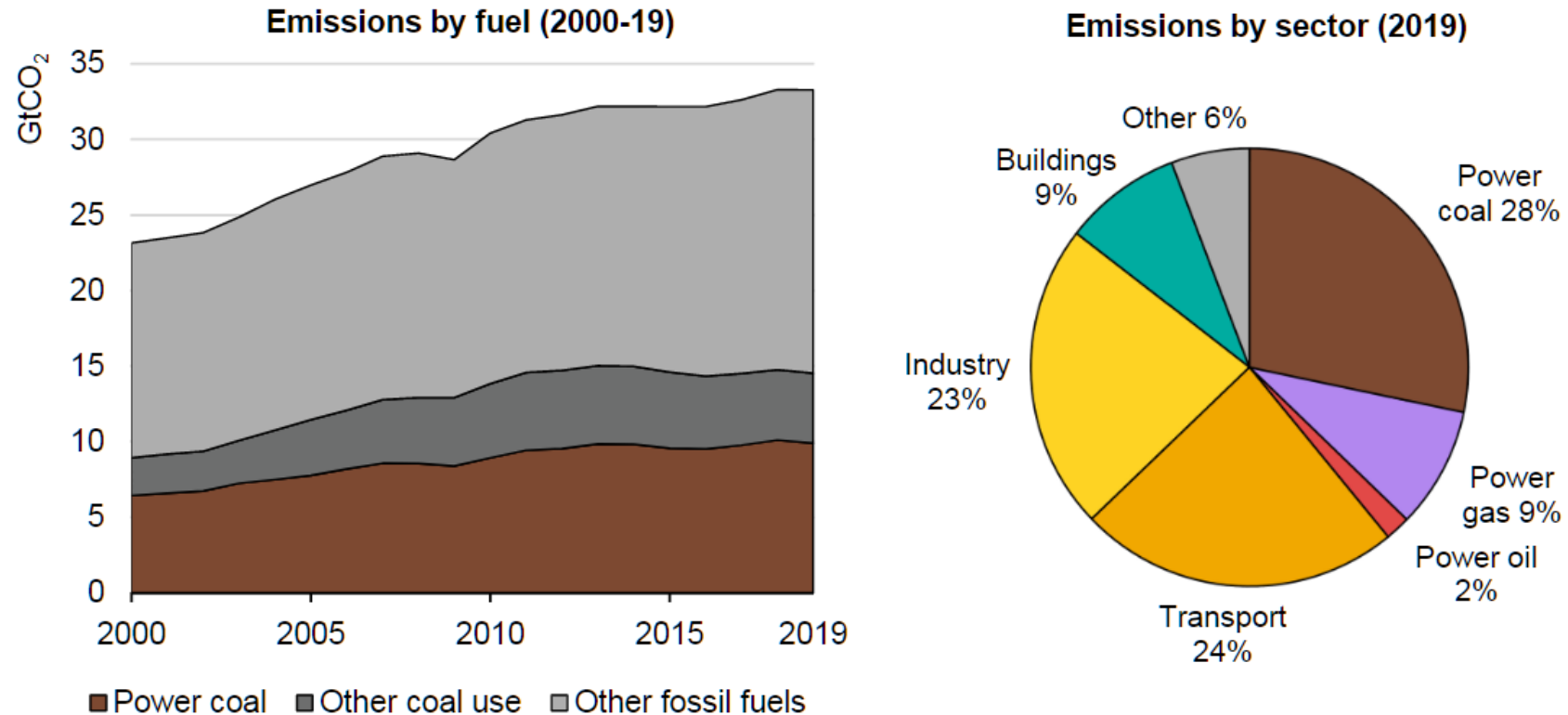
Tartu Ülikool ja mõned Eesti ettevõtted (Elcogen; Skeleton, H2Electro, AuveTech) on valmis osalema Eesti taastuvenergeetika kompleksi ja ringmajanduse ülesehitamises, kuna arendavad ja toodavad:

- kesktemperatuurseid tahkeoksiid-(SOFC) ja madaltemperatuurseid (PEMFC, ka Pt-metallide vabu) kütuseelemente (TÜKI, Elcogen, AuveTech, H2 Energy)
- superkondensaatoreid, Li-ioon-, Na-ioon-ja redokspatareisisid, (TÜ, Skeleton)
- vesiniku, CO_2 , SO_x , NO_x ja CH_4 salvesteid (TÜ KI,)
- vesinikku adsorbeerivate materjalide sünteesi ja tankide koostamist (TÜ KI)
- CO_2 ja H_2O kaaselektrolüüsereid (TÜ KI, Elering, Eesti Energia)
- Arendavad ja kasutavad üliuudseid operando meetodeid SOFC, PEMFC, SOEL, PEMEL, superkondensaatorite ja Li-, Na-ion patareide uurimisel töötingimustes (TÜ KI, PSI, HZB, U Lund, U Bern, ETH jne.)



Vaatamata lubadustele jätkavad riigid fossilkütusete põletamist, sest uued tehnoloogiad ootavad alles arendamist ja juurutamist

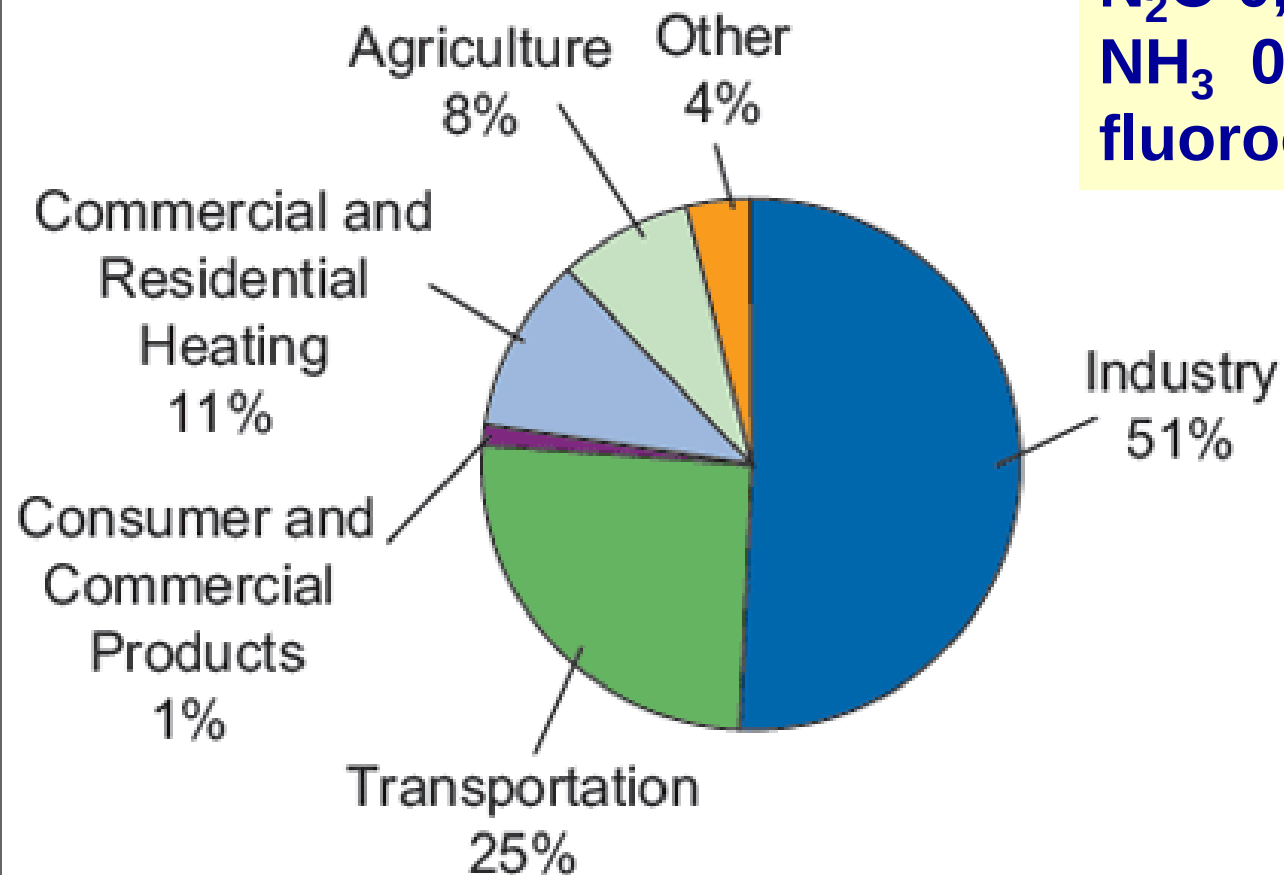
Figure 1.9 Global energy-related CO₂ emissions by fuel (left) and sector (right), 2000-19



IEA 2020. All rights reserved.

Power generation, where coal use is increasingly concentrated, is the biggest emitter of CO₂ worldwide, accounting for about 40% of total emissions.

Sources of Emissions of Greenhouse Gases



Põhiliselt:

H₂O 93-95 %;

CO₂ 3-3,5%

CH₄ 0,9%,

N₂O 0,2%,

NH₃ 0,3%,

fluoroorgaanika 0,1% jne

Temperatuuri tõusuga suureneb veeauru küllastuskontsentratsioon õhus, seega õhu soojusmahtuvus.



Õhusaaste kahjulikud mõjud lisaks kliima soojenemisele:

- Saastatud õhk (**NO_x, SO_x, VOC, NP**) põhjustab **680 000** inimese enneaegse surma südame- ja veresoonkonna haigustesse aastas (Euroopa Liidu maad), kogu maailmas 6-9 miljonit
- Põhjustab **4-6 miljonil inimesel allergia** ja hingamisteede haigusi (EL)
- Põhjustab kuni **28 miljardi suuruse otsese majandusliku kahju ja kuni 2,7 triljonit € kogu kahju!** (EL)
- EASAC Energy Steering Committee ja EASAC Environmental Protection Committee tegi 2020. a ettepaneku maksustada tarbijad nii CO₂ kui ka NO_x, VOX ja NP kahjude kuludega, lisades selle kütuste hindadesse (diisel, bensiin, kivisüsi, pruunsüsi, looduslik gaas ja biogaas)

➔ **fossiilsete kütusete hinnad kerkivad 3-4 korda!**

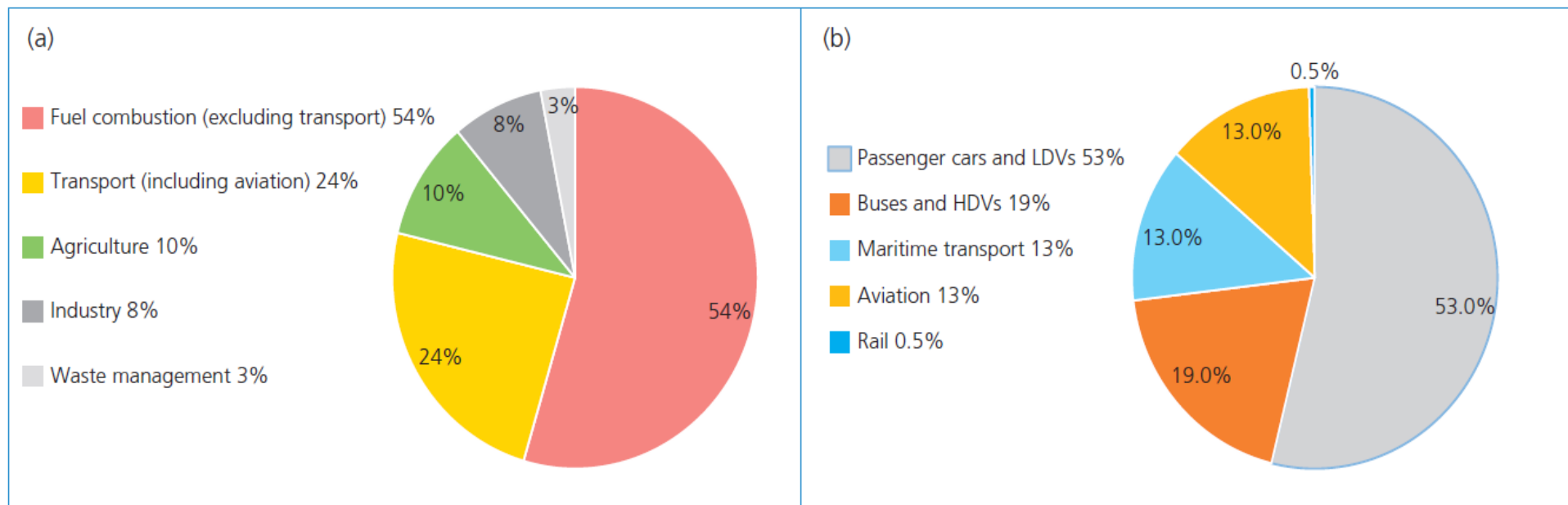
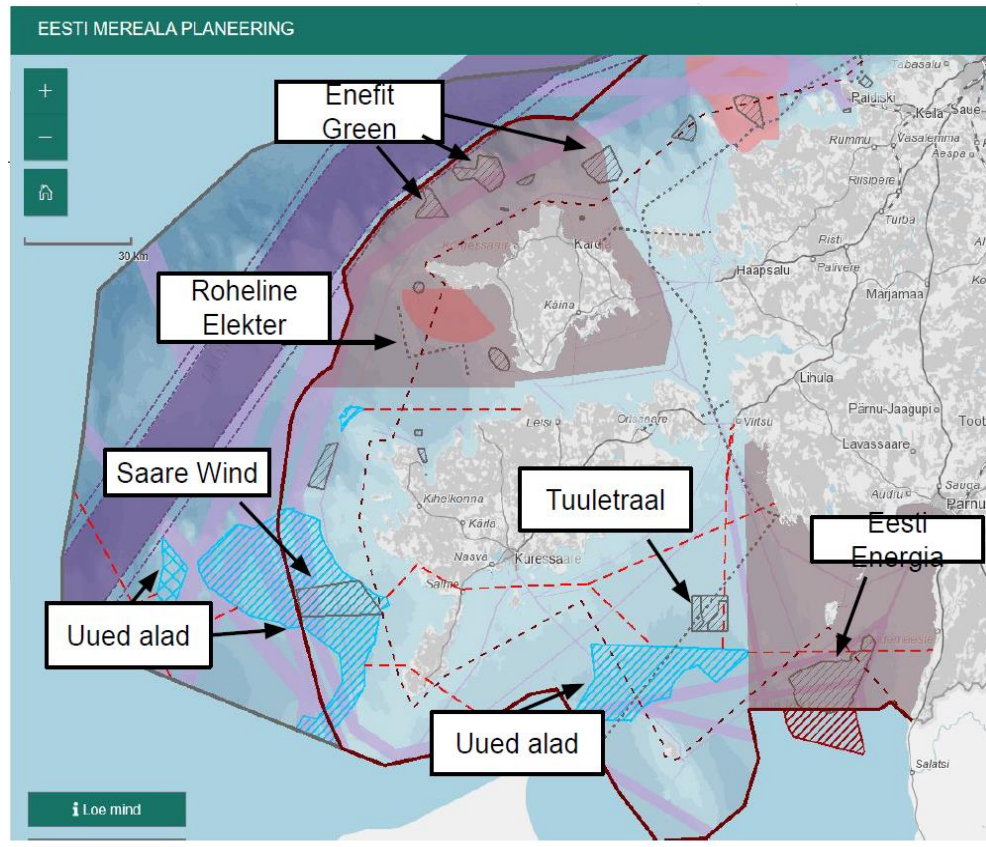


Figure 1.1 (a) Total GHG emissions from the EU. (b) GHG emissions from the EU transport sector.

Meretuuleparkide arendamise alad

- Eesti avamere tuule elektri tootmise potentsiaal on vähemalt **15-23 GW**;
- Tuleb kiiresti asuda ehitama, et toota üliodavat elektrit ja vesinikku merel. Näiteks USA mediaan on **12-14** dollarit **MWh**. Eesti odavam elekter tuleb tuuleparkidest (H.Sutter).
- **Energia transpordiks merelt maismaale vesinikutrassid!** Sama koguse energia transportsüsteem vesinikuna on 6-8 korda odavam ehitada kui alalisvooluna.



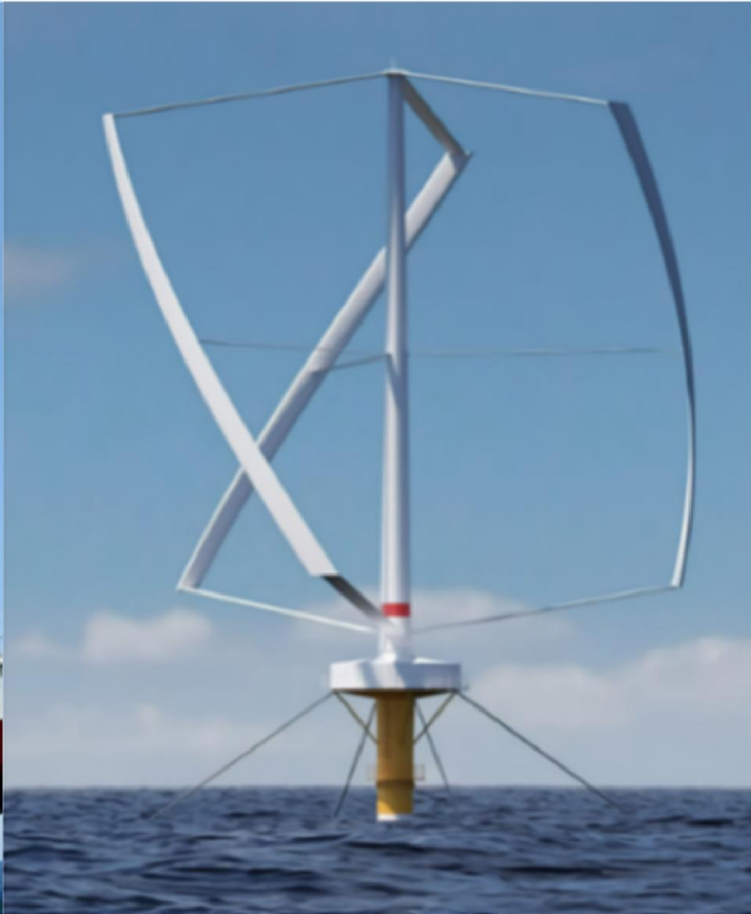
- Tuuleelektri parkide stabiliseerimiseks läheb vaja superkondensaator + patarei + elektrolüüser komplekssüsteeme, mis siluksid volupiigid enne alalisvoolu ülekandevõrku jõudmist.
- Superkondensaatorite lisamine pikendab elektrolüüserite eluiga 2-2,5 korda
- Vesinikust saab taastoota elektrit, kasutada teda transpordikütusena, keemiatööstuses redutseerijana, metallurgias söe asemel, tsentraalküttemajanduses soojuse ja elektri koostootmisel kütuseelementide abil, tsemendi, kunstväetiste, metallide jne tootmisel. Saksamaa ostaks!

Tuulegeneraatorid

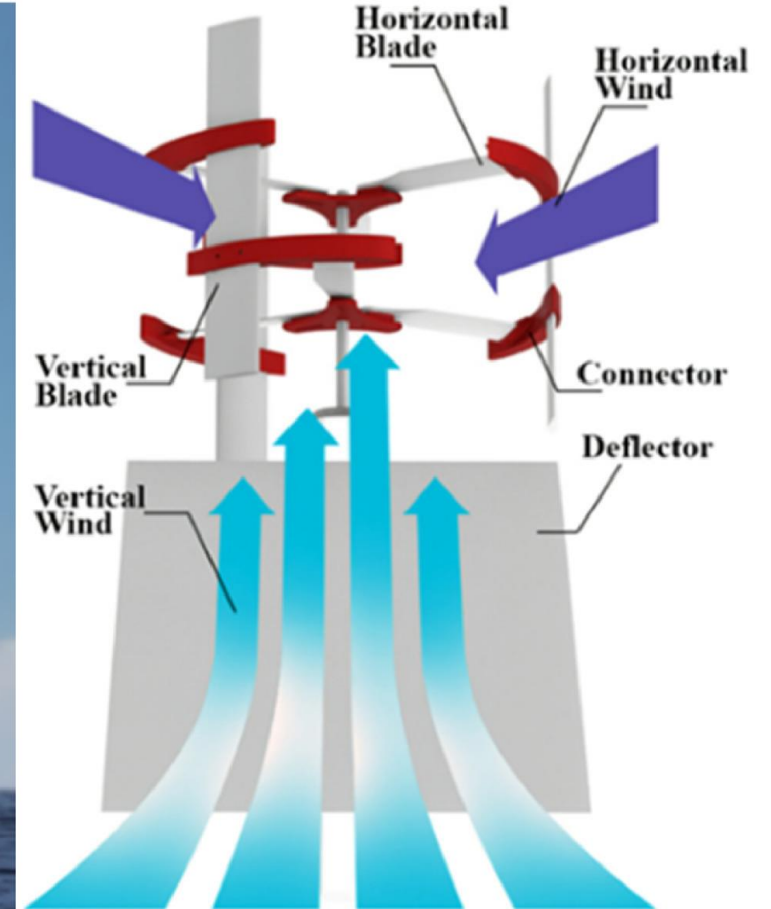
Arendatakse edasi põhiliselt kolme liiki tuuleturbiine



Horisontaalse teljega tuuleturbiin

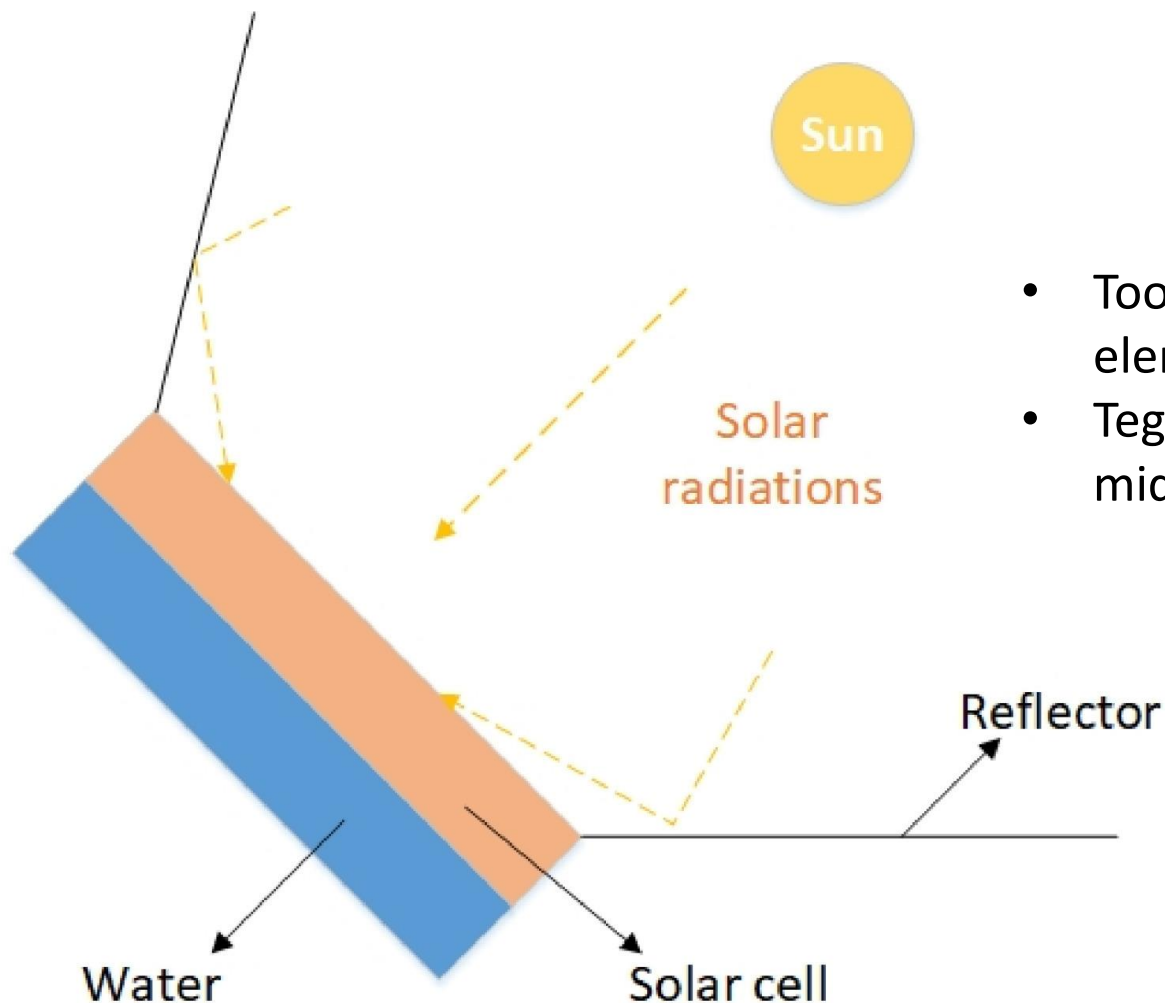


Vertikaalse teljega tuuleturbiin



Ristteljega tuuleturbiin

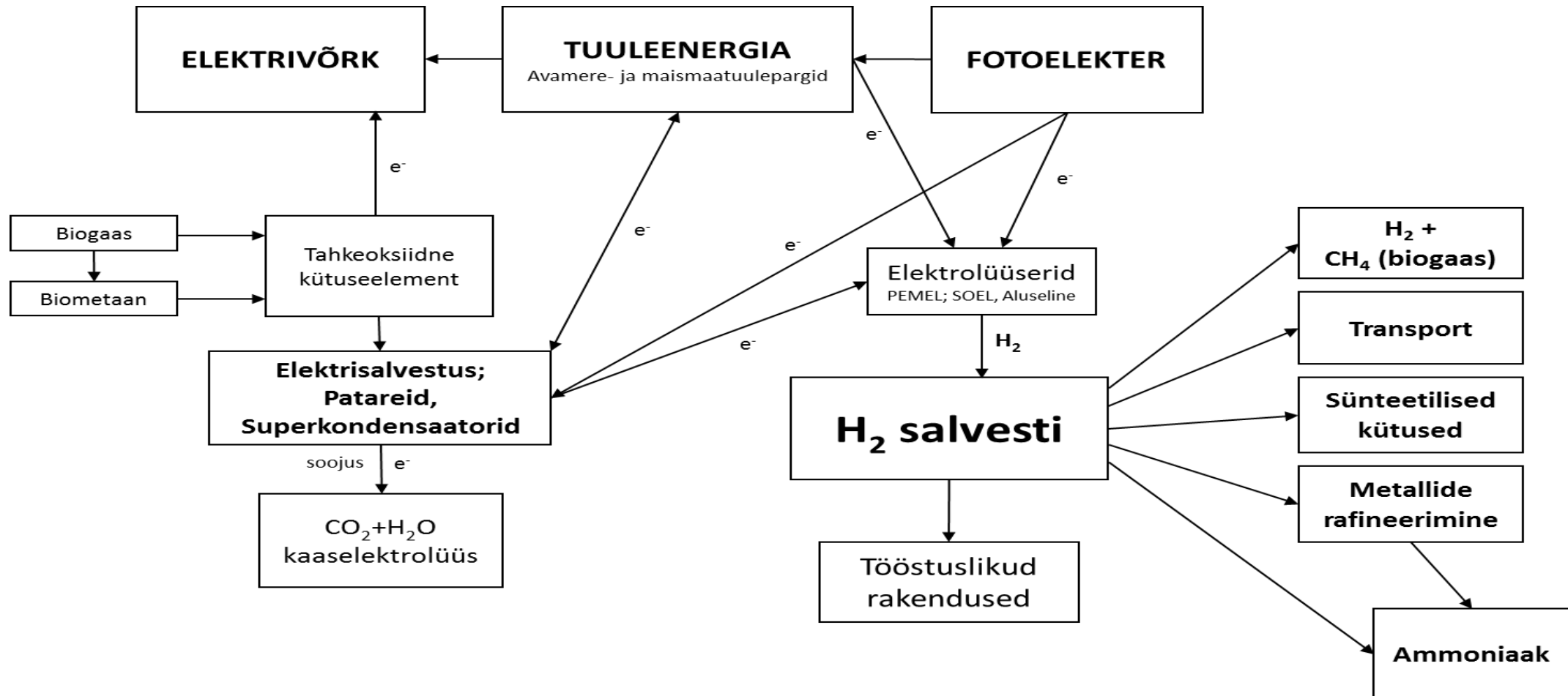
Koondaja tüüpi PV/T süsteem



- Toodab samal ajal PV elektriga ka sooja vett, PV elementi peab kuumas kliimas jahutama.
- Tegemist nn kaks ühes või nn tandemtehnoloogiaga, mida EL eriti otsib ja toetab.

Tuuleelekter pakub uusi võimalusi

- Odav tuuleelekter avab väga palju uusi tehnoloogilisi arenguvõimalusi, millest kesksed on elektrivõrgu stabiliseerimine, vesiniku tootmine ja salvestamine ning kasutamine.
- H_2 kasutamine vähendab CO_2 tekkimist tööstuses, transpordis, metallurgias, küttemajanduses (kütuseelementide kasutamine), bioenergeetikas jne.





Päikeseenergia salvestamise ja taaskasutamise demo/treening kompleks TÜKIs

- Kui väga tahta, siis saab ka Eestis PV elektrit patareides salvestada
- See on lihtsam, kuid samas kallim kui vesinikutsükel

60,0 kW PV demo süsteem

TÜ keemia instituudi (KI) peaesmärk: toota odav ja maksustamata (hinna moonutusteta, roheline energia ja ülekande tasudeta) elekter ja vältida elektri hinna dotatsioonidest tingitud moonutusi

Elektrolüüser 6,3 kW

Optimaalne oleks 50 kW elektrolüüser

H_2 Q

H_2 2 kg

H_2 salvestus
12 x 50 L, 300 bar

H_2

Sünteeskütuse reaktor
($CO_2 + H_2O$) arendamisel

H_2

PEMFC 5,8 kW;
SOFC installeerimine töös

Q

SOFC/SOEL (Ni-vaba) arendamisel

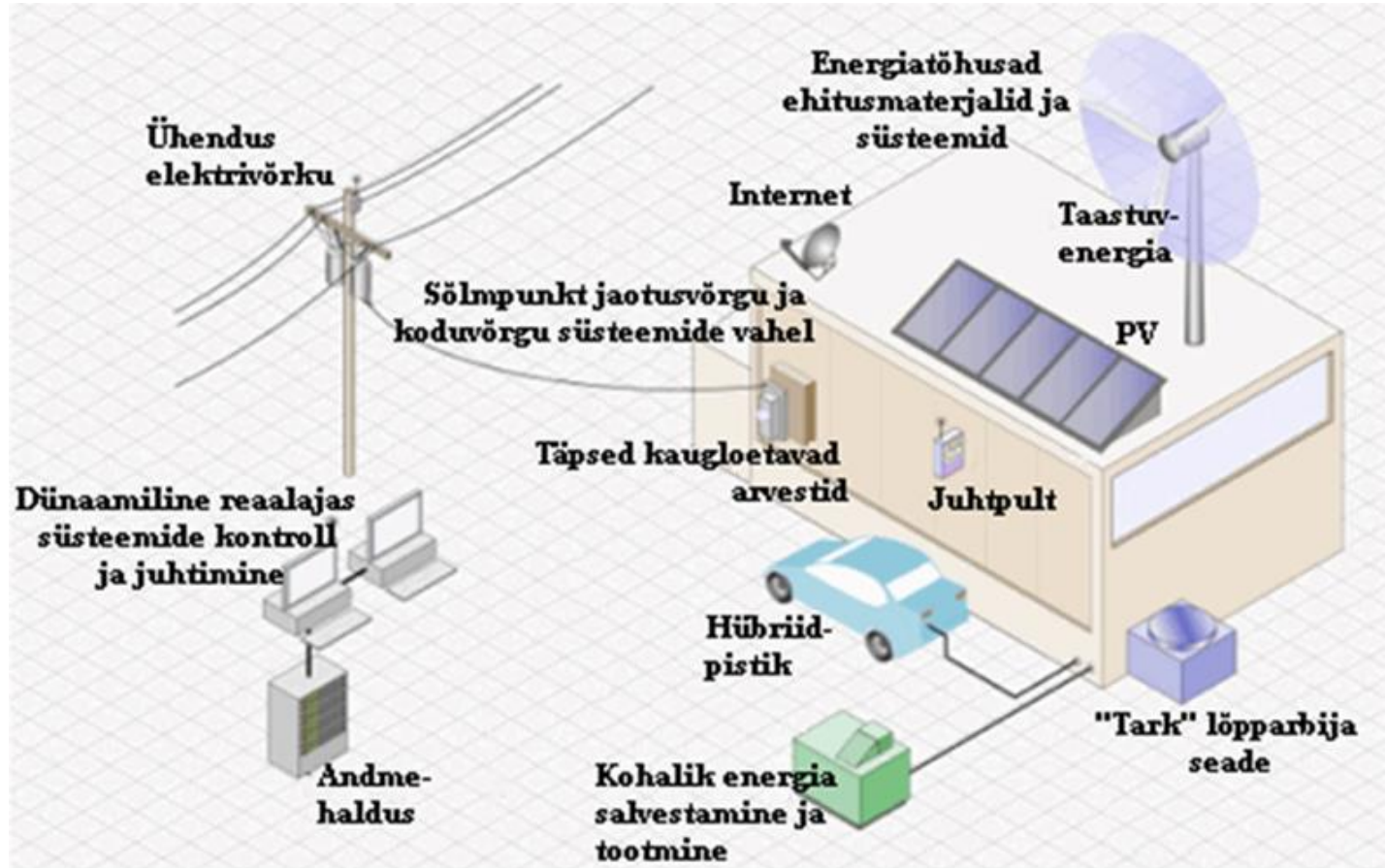
Q
 E

Superkondensaator (TÜ KI, Maxwell, Skeleton)
Li-ioon ja Na-ion patareid (TÜ KI);
Pliiakud, installeeritud 24 x 208 Ah

Eesti elektripaigaldised
1.76 GW

Elekter
võrku

„Targa“ kodu elektrivõrk



Kui nn autonoomne eraldiseisev kodu/ keskus siis optimaalne kooslus oleks:

- 8kW tuul,
- 4kW PV,
- 6-8 kW elektrolüüser;
- 4 kW kütuseelement ,
- 150 kg vesiniku salvesti
- Lisaks kiireks salvestamiseks 8 kW SC ja 0,9 kW patarei.

- PV toodab aastas: 4205 kWh elektrit, millega saab toota 84 kg vesinikku, millest saab tagasi toota 2799 kWh elektrit
- Tuul toodab 35 040 kWh elektrit, millest saab toota 700 kg vesinikku. Sellest saab toota (kui vaja) uuesti 23331 kWh elektrit või vesinikuga läbida 10000 km (Toyota Mirai).

Mõned näited keskmiste komplekssüsteemide optimeerimisest

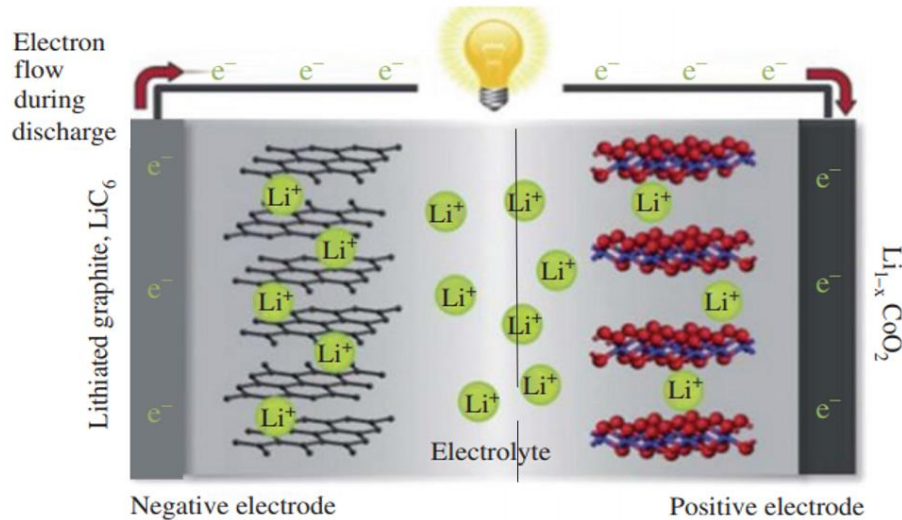
Erinevatel maadel on maksustamise alused erinevad! Seega on ehitushinnad ja elektri hinnad väga erinevad. PV, tuule ja patareide optimeerimine nn eraldiseisva energiasaare (remote island) kohta:

Süsteemi komponent	Maksumus	Eluiga/aastat	Optimeerimise ja hoolduse kulud / % almaksumusest
PV süsteem	1,05 USD/W	20	2
Tuulegeneraator	1,45 USD/W	20-25	4
Patarei	0,5 USD/Wh	8-9	6
Inverter	0,1 USD/W	10-12	-
Diisलगeneraator	0,6 USD/W	6-8	6-8

- Kui kompleks koosneb: **1800 kW PV, 1000 kW tuulegeneraator ja 500kW patareid** (4000 kWh),
- siis tema tootlus oleks **96%** ja nn tasaarvutatud (levelised cost of electricity (LCOE)) oleks **0,32 USD kWh**.
- Kui ollakse nõus, et tootlus on ainult **53%**, siis pole patareisid vaja ja LCOE langeb **0,26 USD kWh**.
- Kui ainult tuule generaator, siis tootlus on **23%** (tegelikult kuni 50%, kui hea koht) ja LCOE ainult **0,18 USD kWh**.
- Kui ainult PV, siis tootlus 39 % (tegelikult aasta keskmine 12-16 %) ja LCOE oleks 0,12 USD kWh.
- Reaalselt: **PV 670 kWh, tuul 2,25 MWh , patareides salvestus 4,3 MWh** ja müügihinnaks **0,9 USD kWh**.

Li-ioon aku

Li-ioon aku tööpõhimõte



Maailmas on:

- 10 miljonit elektri(patarei)autot, põhiliselt Li-ioon akud, energiakulu 140-380 mAh/km
- 660 000 bussi, EUs 44 000 (2019), energiakulu 0,8 -1,2 Ah/km.
- Tavalisi 1,3 miljardit (2015) ja 2,9 miljardit (2030).

- LiFePO_4 on positiivse el. materjal
- Mahtuvus 70% LiNiMnCoO_2 korral või 60% LiFePO_4 korral võrreldes LiCoO_2 -ga
- Li-ioonpatareid kardavad madalaid temperatuure: -20°C mahtuvuse vähenemine
- Laadimine aeglane, tuleks kasutada 10 korda väiksemaid laadimisvoole
- Külmas väga aeglane laadimine,
- Eluiga lüheneb märgatavalt, kui palju laadimisi madal temperatuuril
- Vajalikud vasest voolukollektorid, mis on kallid.
- Toksilised Co, Ni jt katioonid elektroodis (LiCoO_2 , LiNiCoFeO_2 , LiFePO_4 jne)
- Vajalik defitsiitne looduslik grafiit, mis on strateegiline toormaterjal.

- Reaktsioon töötamisel:
 $\text{Li}^+ + 6\text{C} \rightarrow \text{LiC}_6$
 Toimub Li-ioonide interkaleerumisel grafiidikihtide vahele
- Reaktsioon laadimisel:
 $\text{LiCoO}_2 \rightarrow \text{Li}^+ + \text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2^-$
 Vajab toimumiseks voolu

Kriitilised materjalid - grafiit

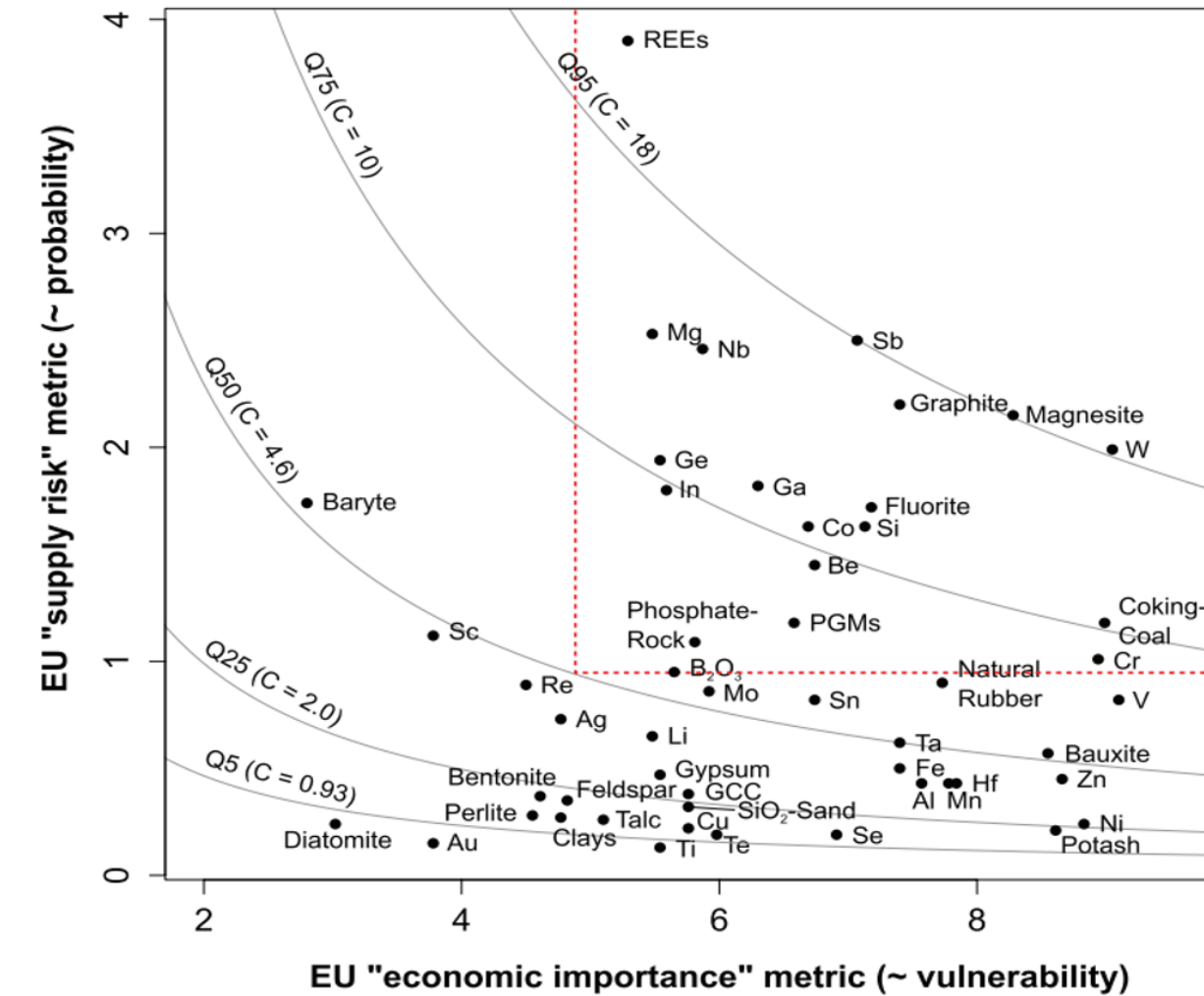


Figure 3. Re-plot of the criticality plot used in the EU study (EU Commission 2014) to identify critical raw materials, showing both the boundary of the criticality field used by the EU (broken line), and contours of constant criticality calculated as the product of the two assessment dimensions (i.e. $D \cdot V$; grey lines). Contours show the 5th, 25th, 50th, 75th, and 95th quantiles of the distribution of overall criticality scores, as labelled. Plot data from EU Commission (2014), inspired by Glöser *et al* (2015).

- Looduslik grafiit ja nn coking coal on riskirühma materjalid!
- Senini grafiit tuleb Hiinast, Indiast ja Brasiiliast: kokku 1,1 miljonit tonni. Suurimad varud aga Türgis, Austraalias
- Seepärast TÜKIs uuritakse grafiidi asendamise võimalusi sünteessüsinikuga - nn jäiga (nn „hard carbon“), osaliselt grafitiseeritud, turbast toodetud süsinikuga.
- hästi lagunenud mudaturbas oleks muidu CO_2 , CH_4 ja VOX, H_2S , SO_2 tootev jääde.
- Igal aastal jääb Eestis kaevandamata 1.5 miljonit tonni
- TÜ KI osaleb Batteries 2030+ EL raamprogrammi/võrgustiku töös. Regenereerida grafiit selliseks, et teda saaks kasutada uuesti Li-ioon patareide koostamiseks.

Kriitilised materjalid - Li ja Co

Miks naatrium on TÜs aktiivse uurimise all?

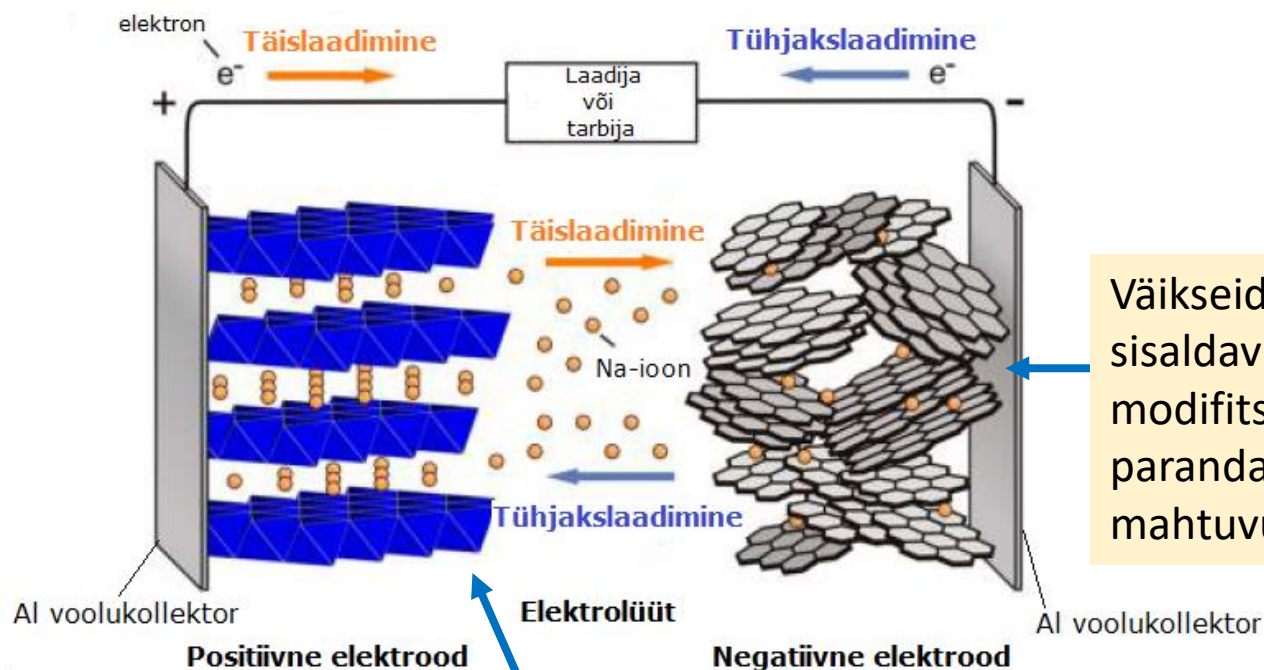
British Geological Survey

Risk list 2015 — Current supply risk for chemical elements or element groups which are of economic value.

Element or element group	Symbol	Relative supply risk index	Leading producer	Top reserve holder
rare earth elements	REE	9.5	China	China
antimony	Sb	9.0	China	China
bismuth	Bi	8.8	China	China
germanium	Ge	8.6	China	
vanadium	V	8.6	China	China
gallium	Ga	8.6	China	
strontium	Sr	8.3	China	China
tungsten	W	8.1	China	China
molybdenum	Mo	8.1	China	China
cobalt	Co	8.1	DRC	DRC
indium	In	8.1	China	
arsenic	As	7.9	China	
magnesium	Mg	7.6	China	Russia
platinum group elements	PGE	7.6	South Africa	South Africa
lithium	Li	7.6	Australia	Chile
barium	Ba	7.6	China	China
carbon (graphite)	C	7.4	China	China
beryllium	Be	7.1	USA	

- Li ja Li-ühendid on kallid ning neid on vähe
- Ka koobalt (positiivselt laetud elektroodi komponent Li-ioon-patareides) on kallis ja seda on vähe
- Põhilised Li tootjad: Austraalia, Hiina, India
- Liitium (ja koobalt) on kõrge tarneriskiga
- **Liitiumit tasuks hoida mobiilsete rakenduste jaoks**
- **Naatriumivarud on suured**
Na on tööstuslik jääkprodukt, mis tekib Cl_2 tootmisel elektrolüüsil
- Naatrium on 20-50 korda odavam kui Li
- Ohutum - akusid saab transportida ka tühjenenud olekus
- Na-ioon akudes saab kasutada alumiiniumist voolukollektoreid - odavamad kui vasest kollektorid

Niisiis naatriumioonpatarei



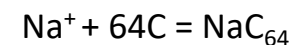
Väikseid grafiitseid alasid sisaldav nn jäik süsinik. Süsiniku modifitseerimisel võimalik veelgi parandada Na-ioon patarei mahtuvust!

- Enam levinud $\text{K}_2\text{FeFe}(\text{CN})_6$ või mõni muu kompleksühend, näiteks $\text{K}_{0.9}\text{CuFe}(\text{CN})_6$
- Uuritakse ka perovskviitsete oksiidide ($\text{K}_2\text{NiMnCoFeO}_{2-d}$) kasutusvõimalusi
- 15 % Co vaja!

- Mahtuvus = 160 Wh/kg või 300 Wh/dm³
- Talub hästi madalamat temperatuuri: -20 °C 145 Wh/kg või 270 Wh/dm³
- 20 °C juures tsüklite arv 1000-1500.
- 2022. a uued elektroodid: kogu patarei peaks olema /tõusma 200 Wh/kg

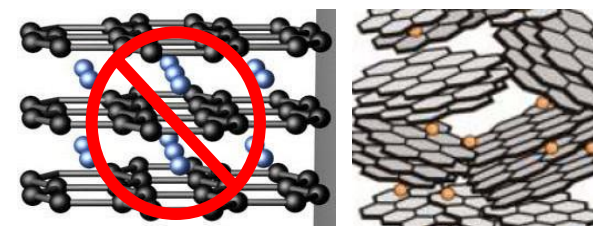
- Naatriumioon patarei - odavam meetod elektri salvestamiseks kui liitiumioon patarei
- Veelgi odavam oleks Pb/PbO₂ või Ni-MeH₂

Grafiiti salvestamisel:



Miks ei saa Na-ioon akudes lihtsalt grafiiti kasutada?

Na⁺ ei mahu grafiidi kihtide vahele.
(R.Väli, A.Adamsoo, E.Lust, et al.)

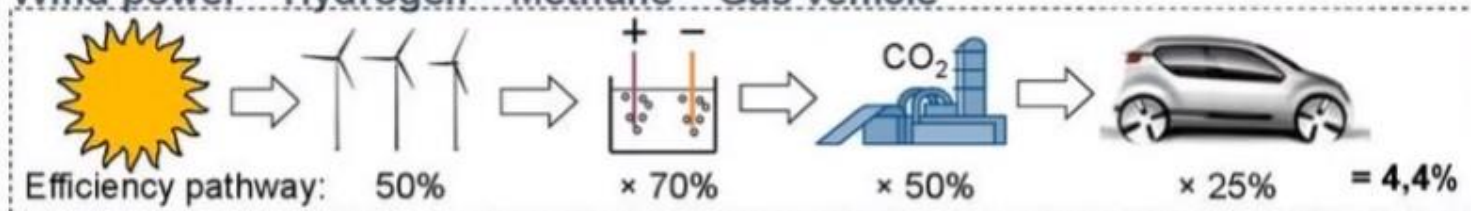


Vajame ebakorrapärasemaid süsinikmaterjale

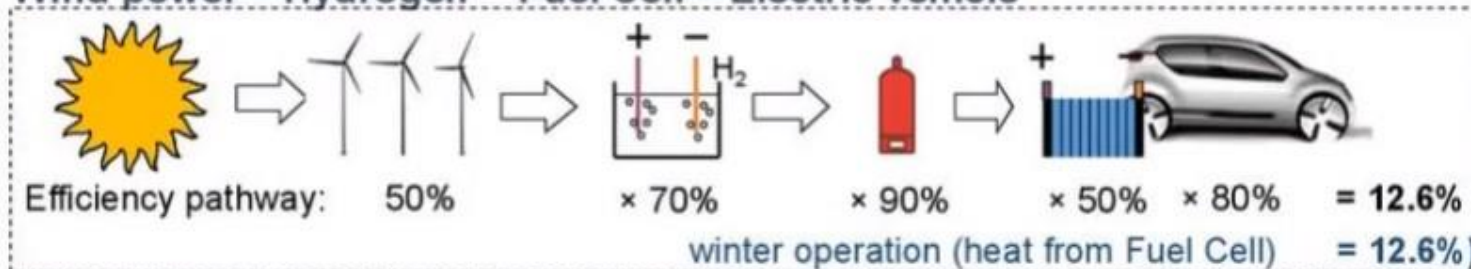
Erinevate süsteemide efektiivsus suvel ja talvel

Efficiency chains compared

Wind power – Hydrogen – Methane – Gas vehicle



Wind power – Hydrogen – Fuel Cell – Electric vehicle



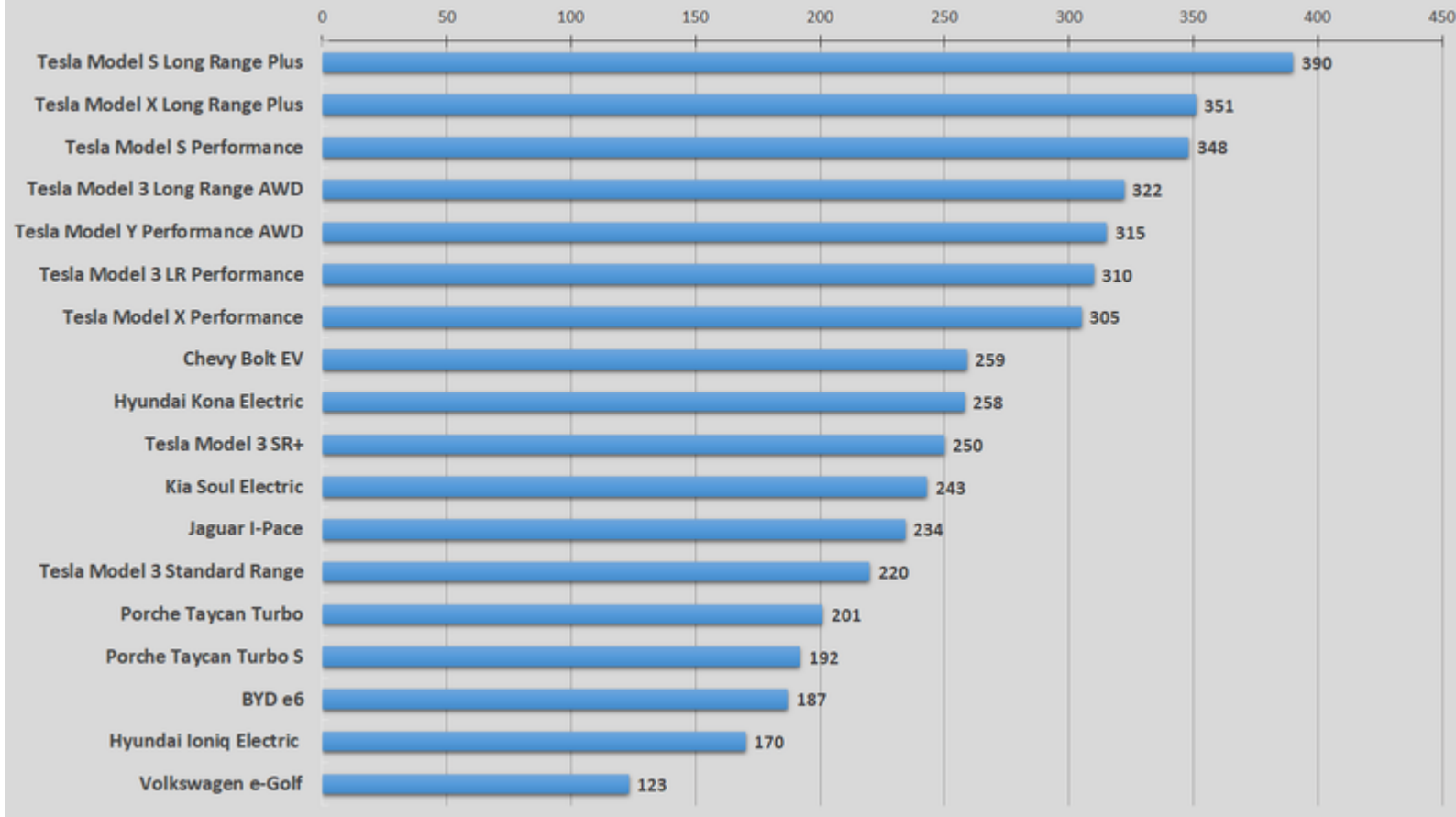
Wind power – Battery – Electric vehicle



- Patareidega auto omab eeliseid, kui keskkonna $t = 10\text{ °C}$ ja kõrgem
- Kui $t < -10\text{ °C}$, siis on juba eelisseisundis FC auto!
- Patareidega auto rentaablus sõltub laadimistevahelise läbisõidu pikkusest! St. kui ta pole üledimensioneeritud, vaid mõeldud 250-300 km läbimiseks. Kui läbisõit ainult 20-50 km päevas, siis on patareide (kuni 630 kg) „sõidutamiseks“ kulunud energia hulk väga suur. Asjatult toodame soojust, mis levib keskkonda.

Elektriautod, miks mitte!

All-electric car EPA rated range per full charge
(2020 model year in miles)



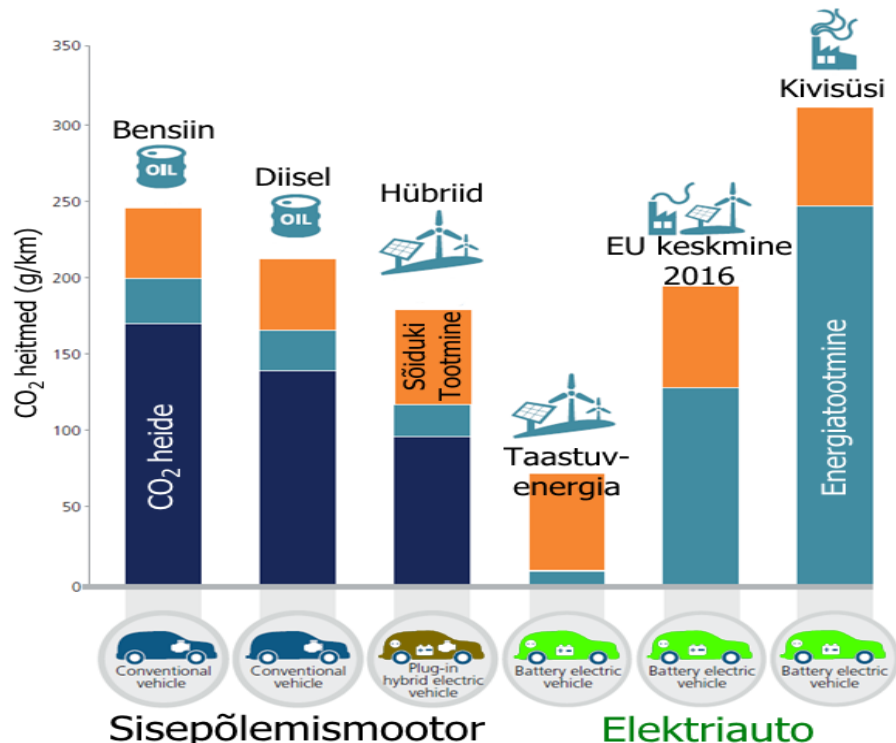
- Oleme jõudnud patareideni, mille ühe laadimisega läbisõit on 700-750 km
- ...ainult et auto kaalub 2380 kg ja patarei sellest 638 kg

Comparison of EPA-rated range for model year 2020 US electric cars up until January 2020

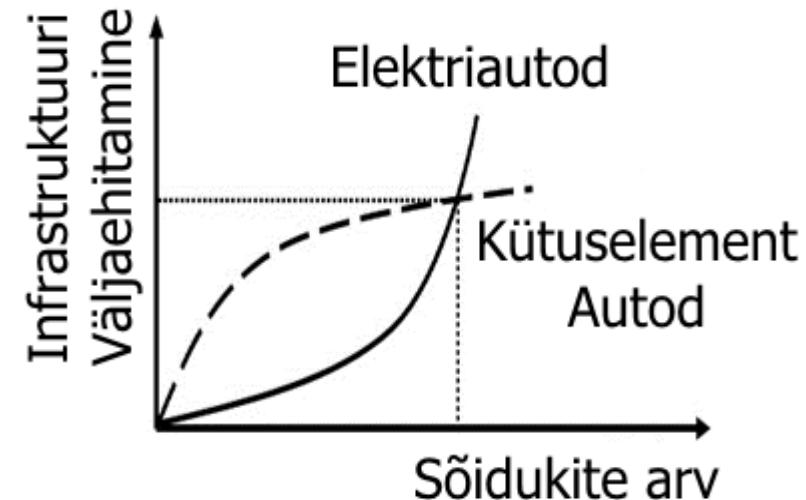
https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_electric_vehicle

Kas elektrifitseeritud transport või vesinik?

- Elektrifitseerimine on kordades (2 - 2.5 x) kallim kui vesinikutehnoloogia arendamine
- Ülekandeliinide ja transformaatoralajaamde ehitamine on kallis! Linnades pole ruumi ja vabu elektrivõimsusi
- Uudsed vesinikutrassid (spetsiaalsetest armeeritud polümeeridest, 150-300 €/km) tootmiskohtadest Eesti linnadesse ja teistesse tarbimiskohtadesse!
- Trassid Liivi lähelt ja mujalt Paldiskisse (sadamasse), Pärnusse, Riiga, Rootsi jne



https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Decarbonisation_of_Transport/EASAC_Decarbonisation_of_Transport_FINAL_March_2019.pdf



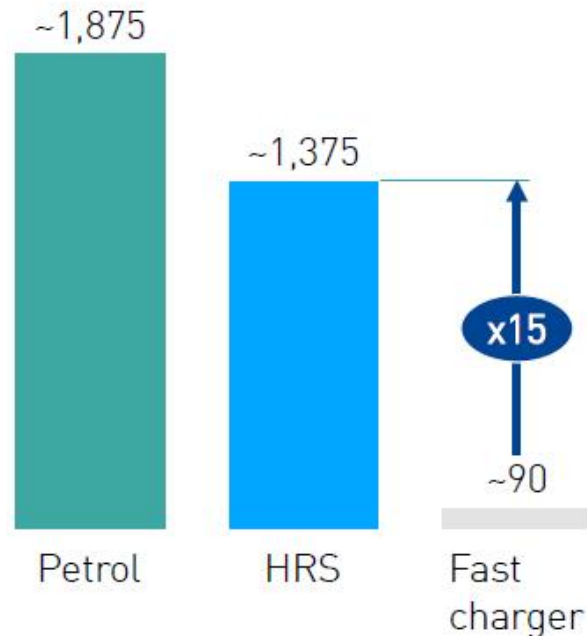
Laadimise infrastruktuur vs. vesiniku infrastruktuur

U. Büniger et al., Chem. Ing. Tech. 2018, 90, No. 1–2, 113–126

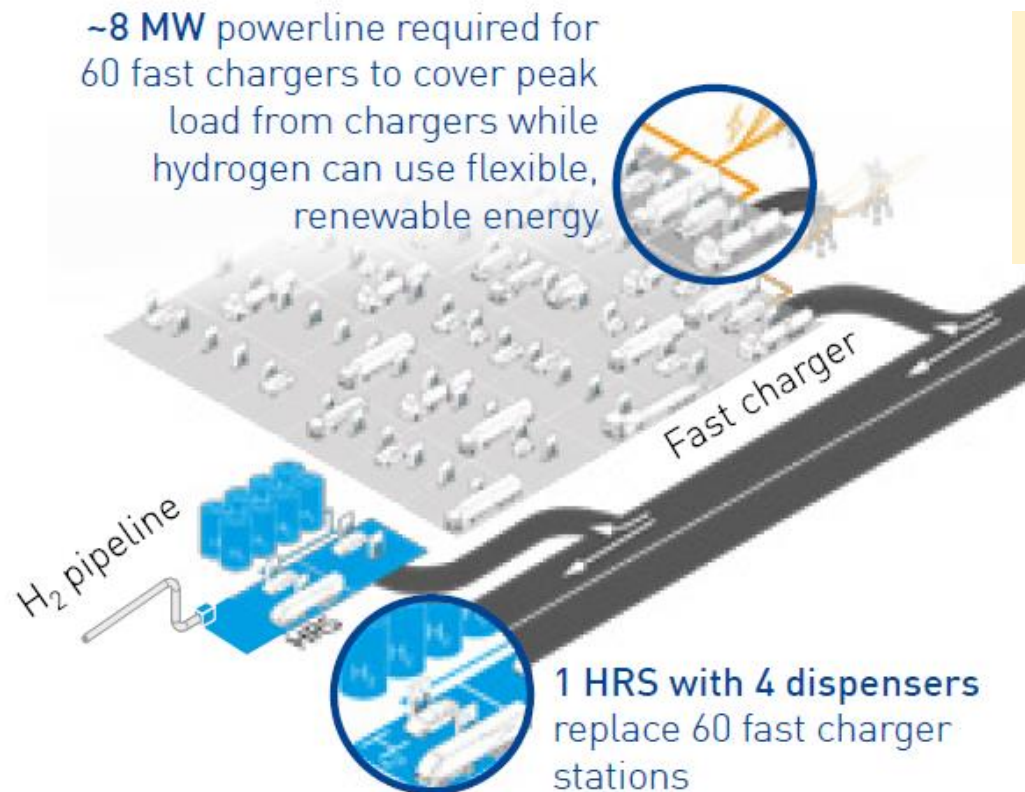
EXHIBIT 11: IMPLICATIONS OF REFUELING SPEED ON SPACE REQUIREMENTS AND INVESTMENTS

Refueling speed

Km/15 minutes of refueling

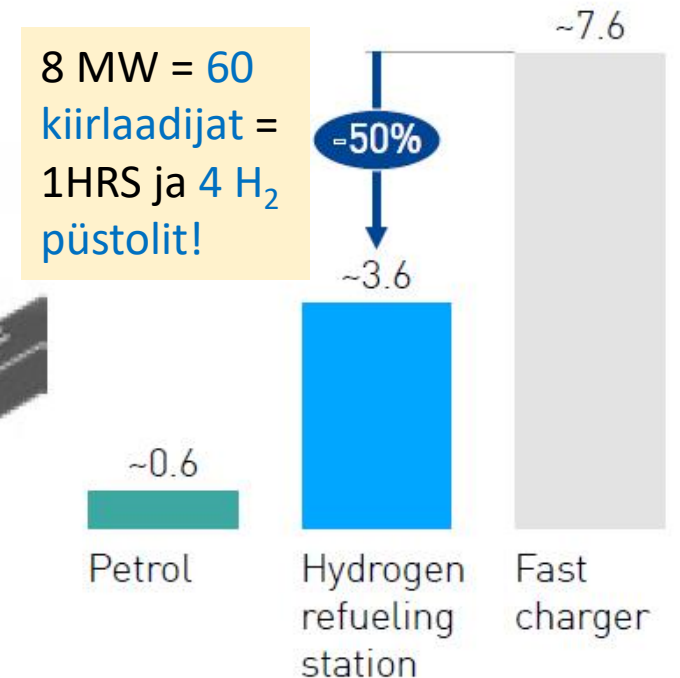


Space requirements



Investment costs per refueling

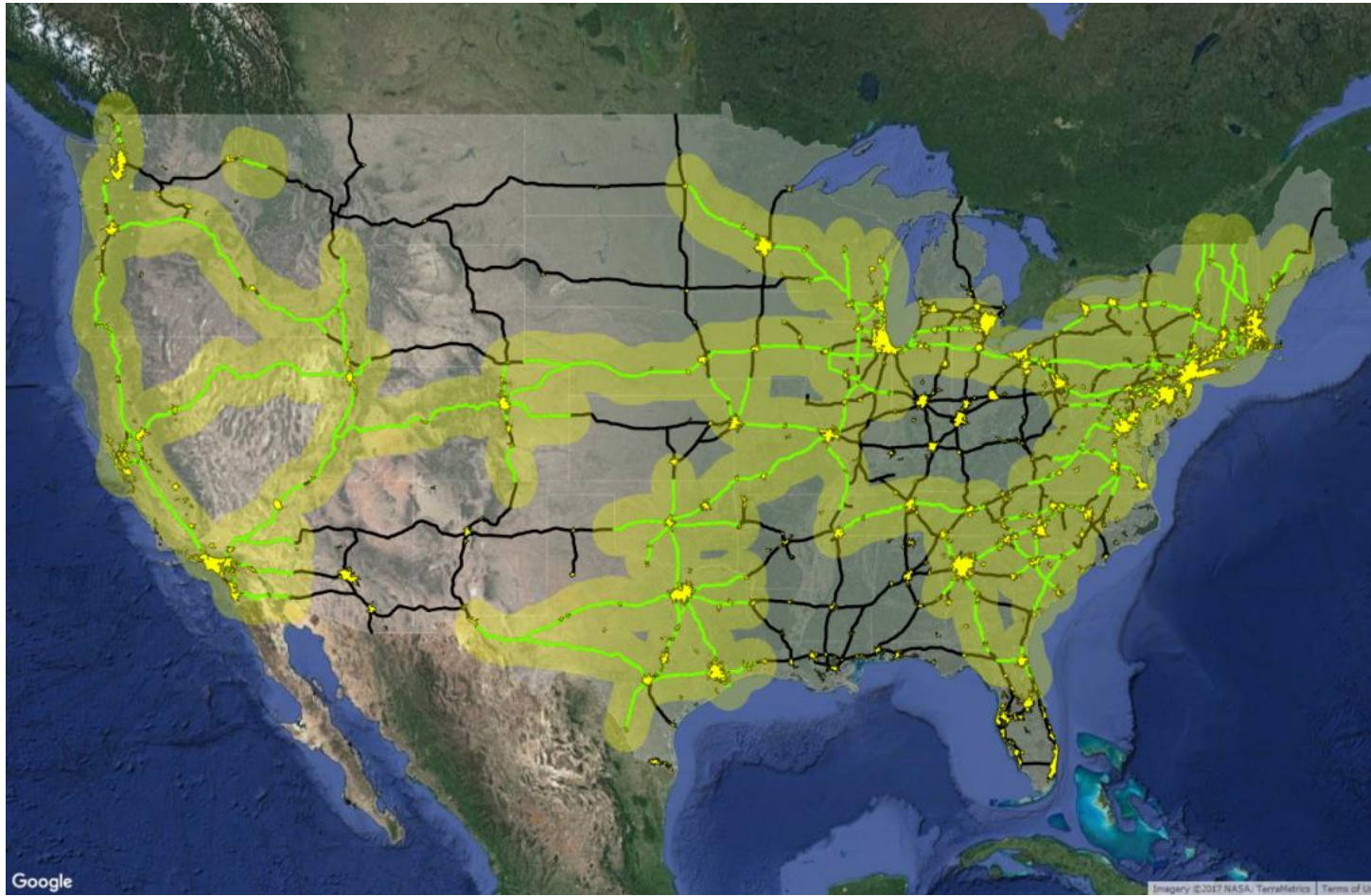
EUR/refueling



Assumptions: Average mileage of passenger car = 24,000 km; number of PCs in EU in 2050: ~180 million; ICE: range = 750 km/refueling, refueling time = 3 minutes; FCEV: range = 600 km/refueling, refueling time = 5 minutes, fast charger = 1,080 km²; BEV: range = 470 km/refueling, refueling time = 75 min, gas station = 1,080 m²; WACC 8%; fast charger: hardware = USD 100,000, grid connection = USD 50,000, installation costs = USD 50,000, lifetime = 10 years; HRS: capex (1,000 kg daily) = EUR 2,590,000, lifetime = 20 years, refueling demand/car = 5 kg; gas: capex = EUR 225,750, lifetime = 30 years, 1 pole per station

Euroopa tagaajaja rollis

The Future of Electric Charging Stations Projected in 4 Simple Maps,
OCTOBER 18, 2017



Next stage: 96 to 239 fast-charging stations depending on station spacing

<https://energy.gov/eere/articles/future-electric-charging-stations-projected-4-simple-maps>

**EL peab väga pingutama,
et jõuda järele USA-le ka reaalses elus**

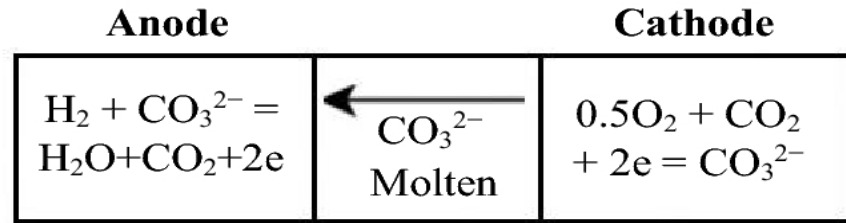
Biden- Harris USA infrastruktuuri uuendamise/taastamise kava:

- 1,2 triljonit infrastruktuuri ja teaduse taastekava: 22 tuhat miili kiirteid: iga 50 km järel kiirlaadimisjaamad ja 150 km järel vesinikutanklad; uued sillad viaduktid
- 180 miljardit NSF restruktureerimiseks.
- 90 miljardit energiaosakonna loomiseks,
- 60 miljardit pooljuhtide uurimiseks,
- 60 miljardit haruldaste muldmetallide tootmise, kasutamise ning taaskasutamise uurimiseks.
- 100 miljardit nn eriprojektide (kõrge riskiga või liiga suured ja multivaldkondadevahelised) rahastamiseks.

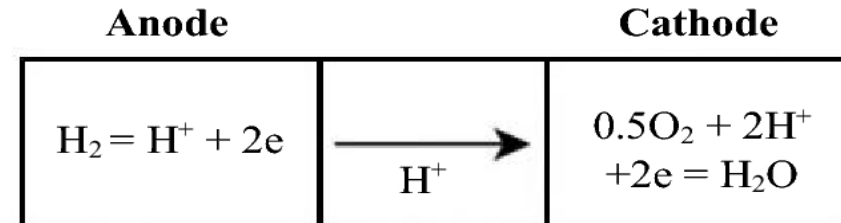
Kütuseelemendi tehnoloogiad

50-60% (HHV), 600-800 °C, kütuseks CO, H₂, CH₄

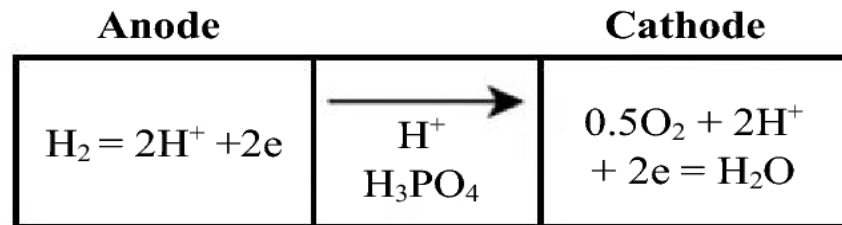
40-48%, 60-85 °C, kütuseks puhas H₂



MCFC

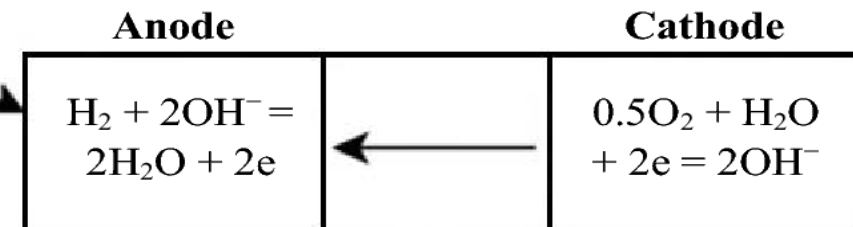


PEM



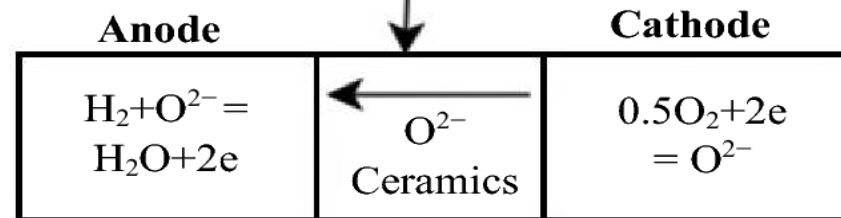
PAFC

40-45% (HHV), 200-250 °C, H₂, lühike eluiga



AFC

40-45 %, 230-280 °C, kütuseks puhas H₂



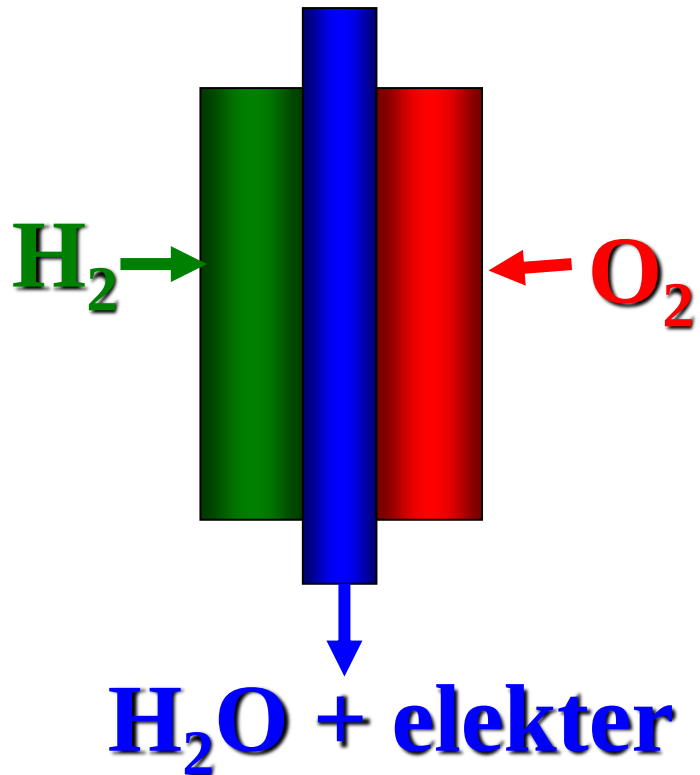
SOF

55-65%, soojus 20%, 650-850 °C, kütuseks H₂, CH₄, NH₃

Kütuseelement

$$\Delta E^0 = -\Delta G/nF = (RT / nF) \ln K_a$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$



- Teoreetilised alused: W. Ostwald, 1896 (mida kõrgem T, seda suurem kasutegur)
- Esimene kütuseelement: Sir W.Grove ,1839; Pt/Pt element H₂SO₄ vesilahuses. Töötab mitukümmend aastat (kui mitte sadu aastaid).

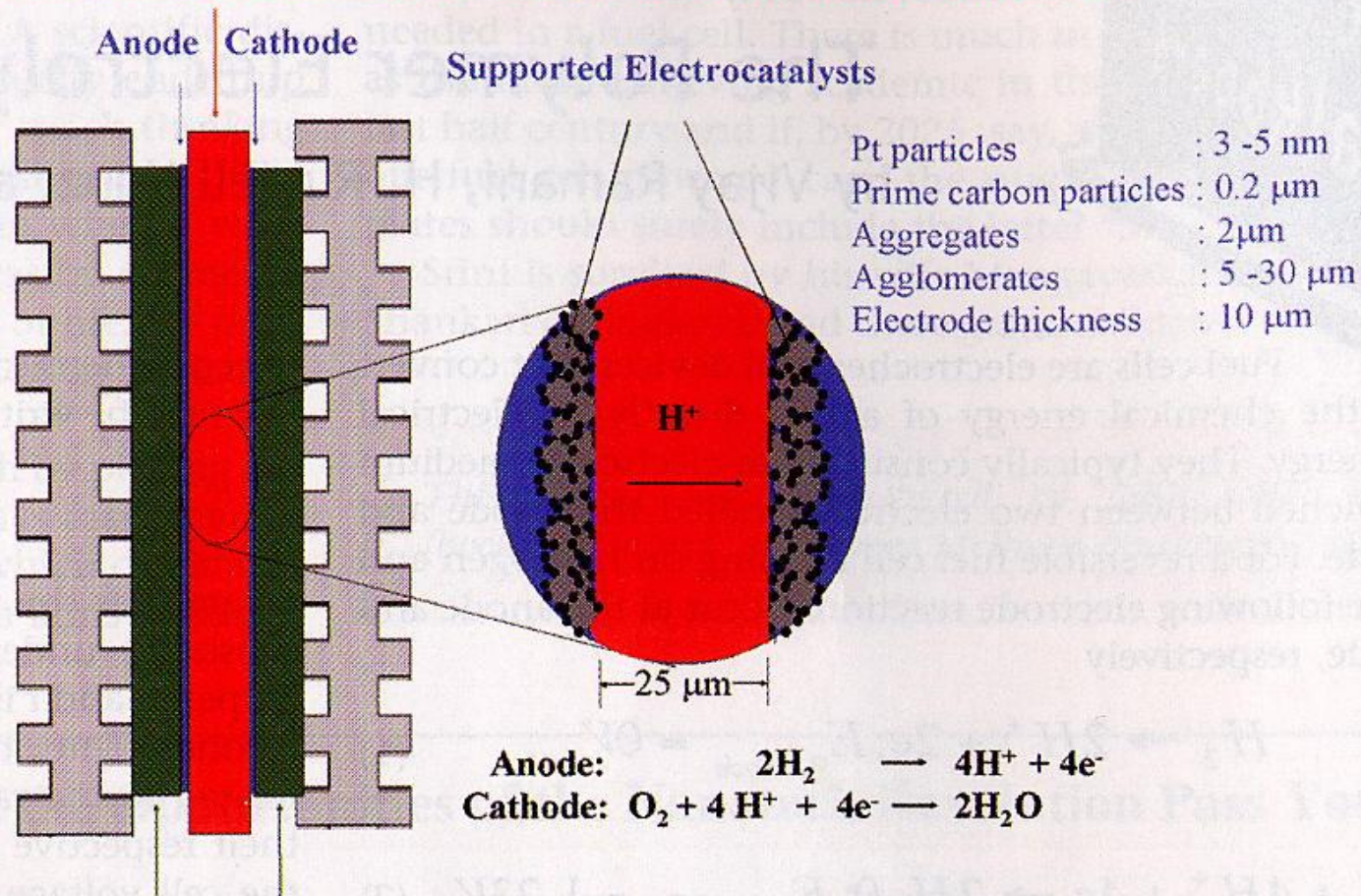
NASA Apollo projekt: Case Western Reserve Un., E. Jaeger, 1960-2020.

- Momendil:
 - 26 600 väikeautot (Korea, USA, Jaapan),
 - 6 000) bussi (USA, Korea, Hiina)
 - 3200 veoautot (USA, KOREA, Hiina).
 - 300 000 kuni 500 000 FC kahveltõstukit.

PEM kütuseelement

Schematic of a PEFC listing key dimensions

Proton Exchange Membrane (25 -185 μm thick, sulfonic acid clusters: 5 nm)



• Kogu Pt tarve maailmas 250 tonni aastas:

- tööstuskatalüsaatorid -50%,
- kütuseelemendid-15-20%,
- juveelitöösus 15-20%
- investeering-ud pangas

• Pt-metallide tarve energiaallikates:

- Kui 12g Pt 70 kW PEMFC, siis aastane tarve 2025. a 42 tonni, 2050. a 450 tonni.
- Elektrolüüserites Pt ja Ir (IrO_2) vajadus palju suurem - 2-3 mg/cm^2 .
- Pt kogus PEMFC rakus: 0,4-0,6 mg/cm^2 . Ajaline stabiilsus kuni 5 aastat. Kui tõsta 3,0 milligrammile siis 15-20 aastat (Fraunhofer inst. results (2021))

Kuidas hinda alandada?

- PEMFC ja PEMEL hinna alandamine peab tulema elektroode teenindavate komponentide kaasajastamise arvelt (2020: 500-600 €/kW, 2030: 150-200 €/kW).
- Pt metallidel baseeruvad elektrodid ise on hästi uuritud ja disainitud, Pt-vabad pole sobivad pikemaajaseks kasutamiseks
- 5 kW PEMFCs on ainult 6-8 g Pt, mis maksab 180-240 € (1g Pt = 30 € ja 1g Pd = 32 €)

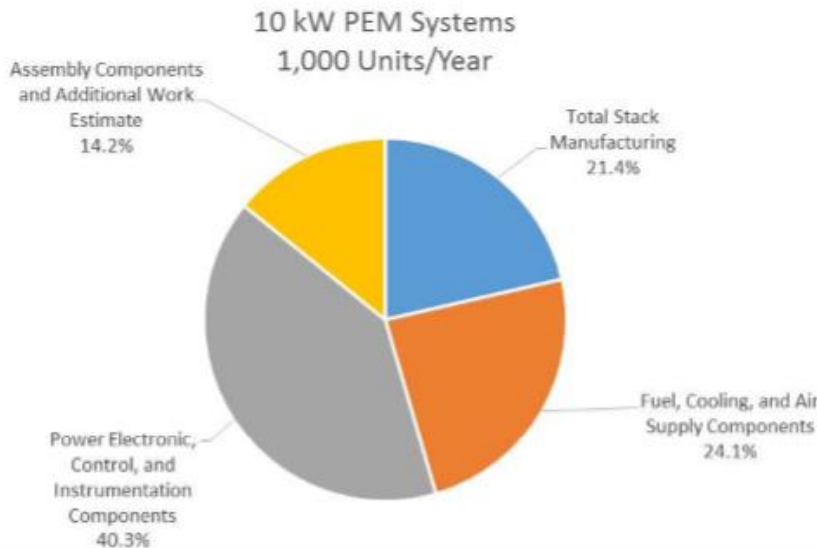
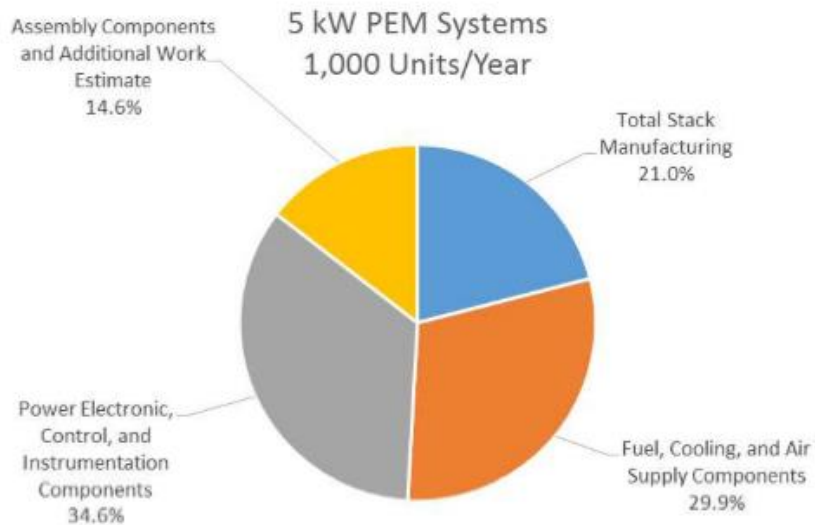
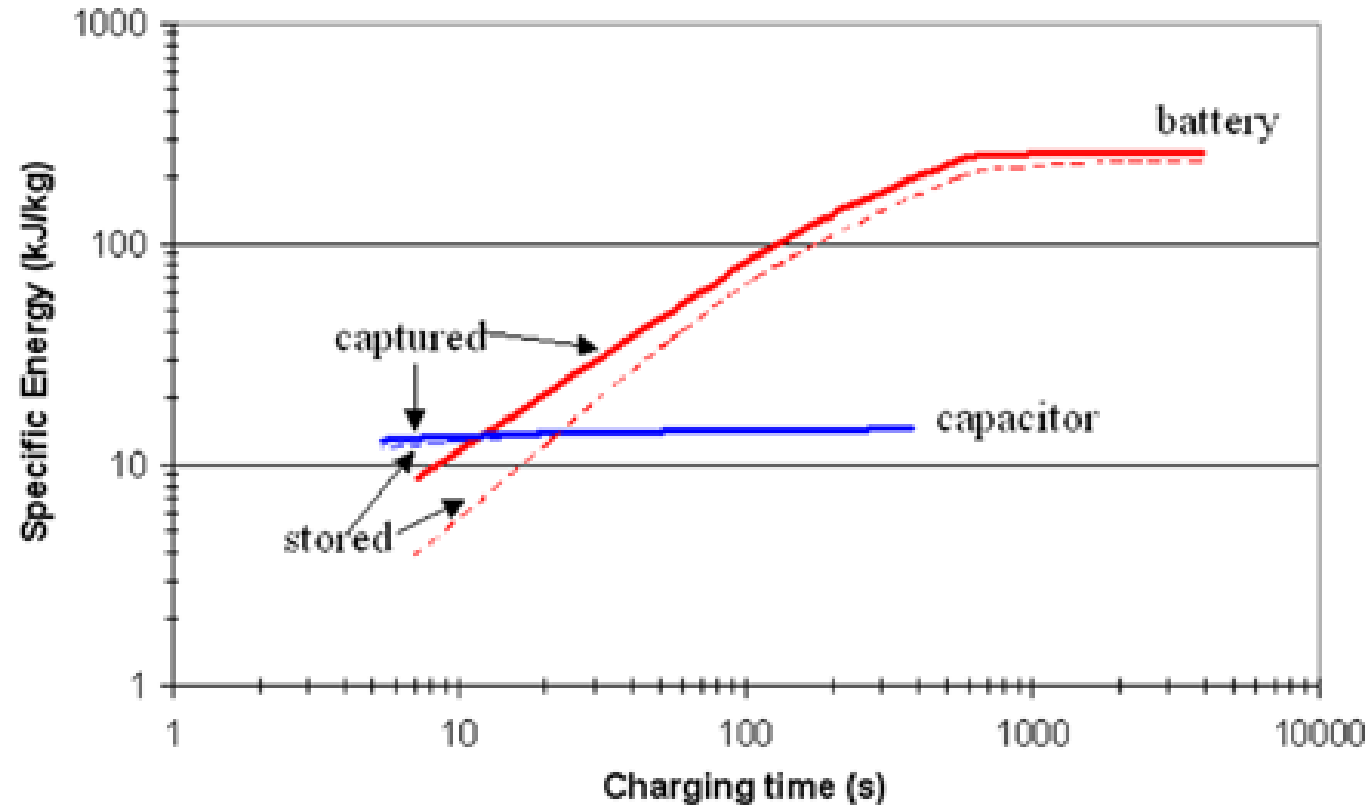


Figure 10-1. PEM system costs at 1,000 units per year

<https://energy.gov/eere/fuelcells/downloads/manufacturing-cost-analysis-pem-fuel-cell-systems-5-and-10-kw-backup-power>

Energia salvestamine



Linnaliinibussid, prügiautod, kaubaveokid
saab sõitma panna ka ainult
superkondensaatorite energia arvelt
Kõige odavam lahendus!

- $12 \text{ kJ/kg} = (12 \text{ kA} \times 1 \text{ V} \times 1\text{s})/\text{kg} = 12 \text{ keV/kg}$
- $12 \text{ kJ} = 30.613 \text{ kF}$ kui SC $U = 2.8 \text{ V}$
- Kiireks laadimiseks kasutatakse
- 10 kuni 30 korda suuremat superkondensaatori patareid: seega 300 kuni 1000 kF (2.8V).



Hybrid city transit bus that uses an SC energy storage system

Vesinikubuss

1 Ah = 3600 kulonit
1 F = 1 kulonit / 1V.

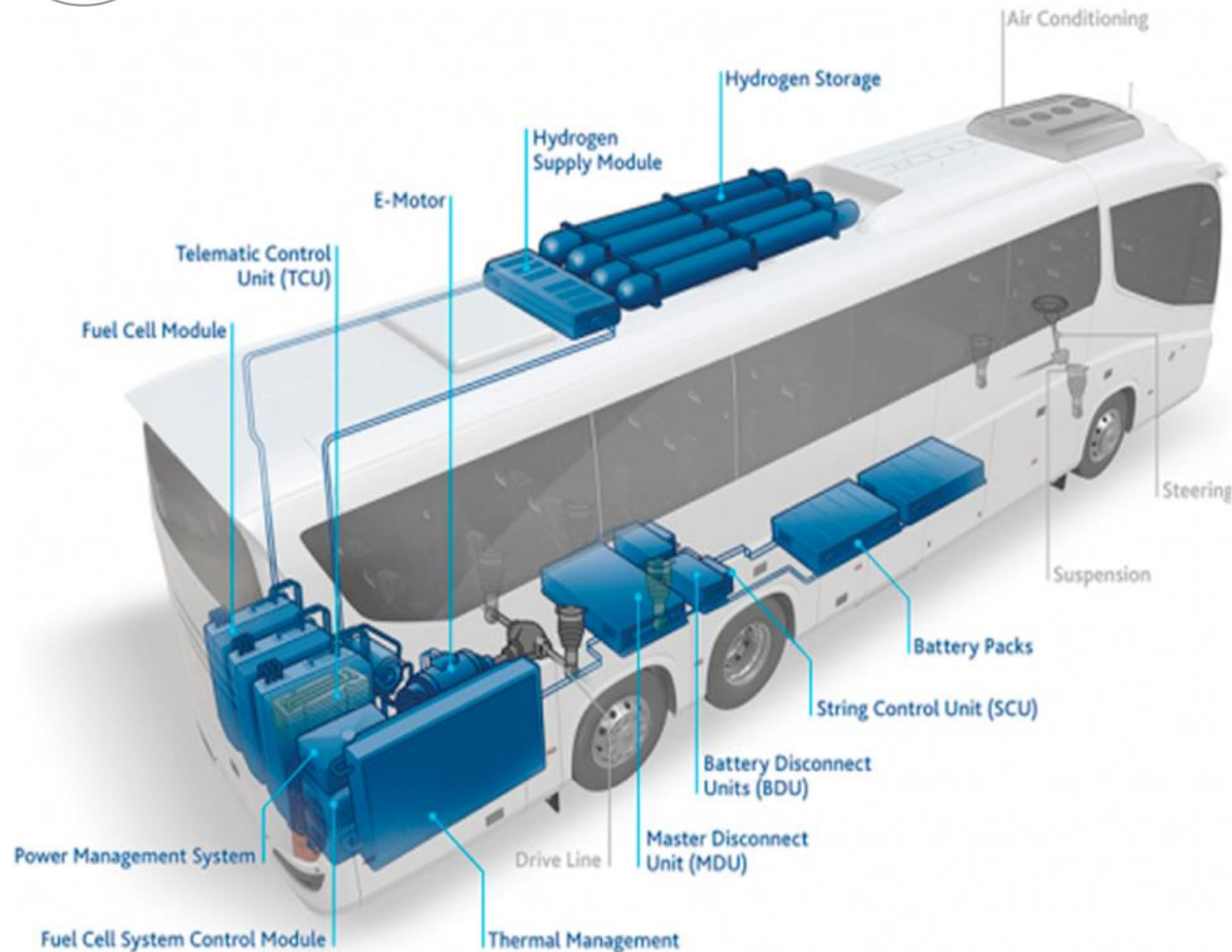
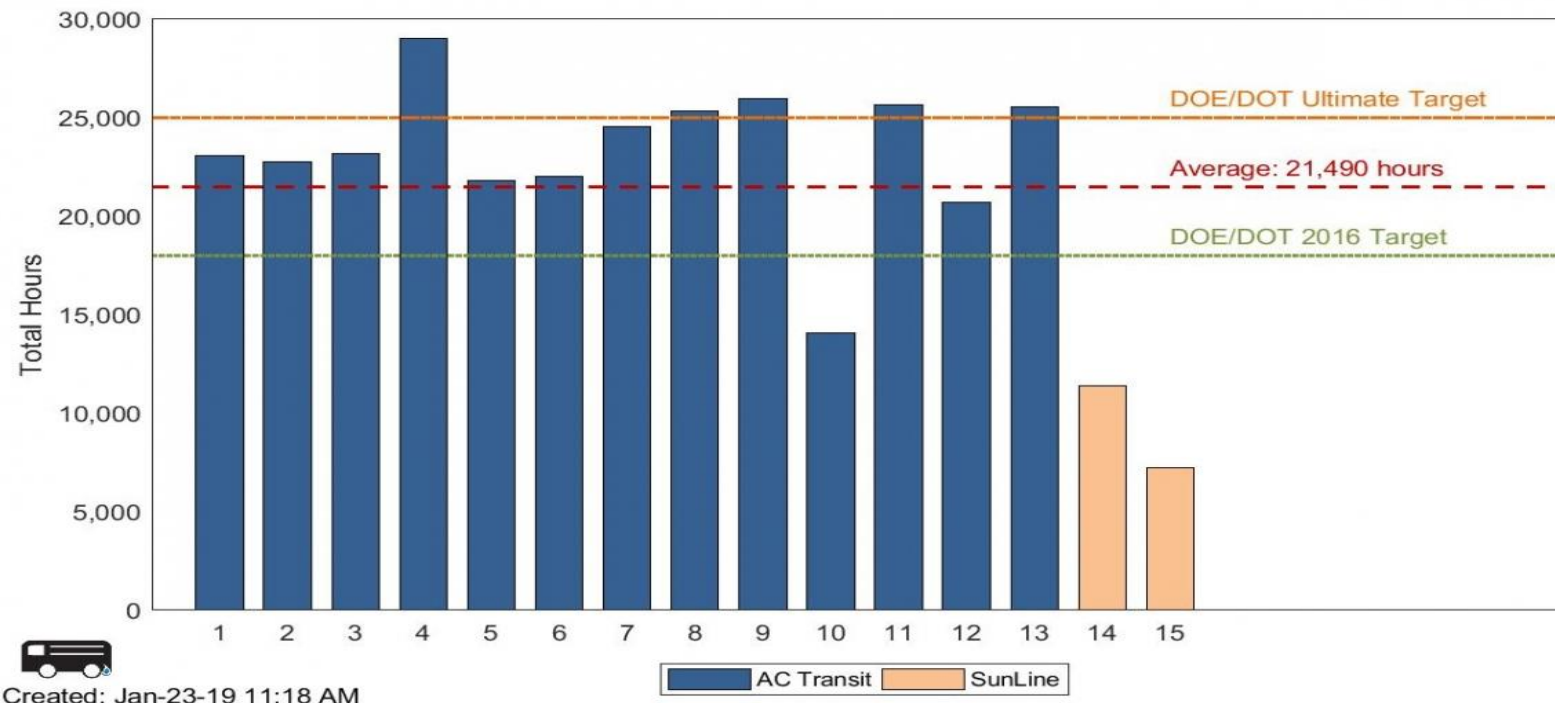


Fig. 11. Flixbus fuel cell composition [107].

- Vesinikubussil on lisaks kütuseelemendile ka superkondensaatorite plokki ja patareid
- Need on vajalikud kütuseelemendi stabiilseks tööks
- Pikendab nii kütuseelemendi kui ka patareide eluiga
- FC = 150 kW, patarei = 50 kW, SC = 150 kW
- Kondensaator 4000F potentsiaaliga 3,2 V omab lõplikul aeglasel tühjenemisel mahutavust 5,69 Wh ning energiat 20,48 kJ. Tavaliselt tühjendatakse kuni 1.6 V-ni, sest muidu muutub tühjenemisel eralduv laenguhulk ajaühikus liiga väikeseks

Statistilised andmed PEMFC busside läbisõidust

- Detailselt analüüsitud vähemalt 3500 FC bussi;
- Eksplutatsioonikulud **10-15% väiksemad kui diiselmootoritega bussidel.**
- **POLE NO_x, SO_x, VOC** ja nanoosakeste saastet!
- Kokku läbinud üle **25 miljoni km (Ballard FC baasil 15 miljonit km)**
- ainuüksi Londonis 2.45 miljonit km; Aberdeenis 1.36 miljonit km.
- Ei saa aru, mida Eestis KARDETAkse? Asumist progressi tee? Kas viga on informatsiooni või teadmiste puuduses?



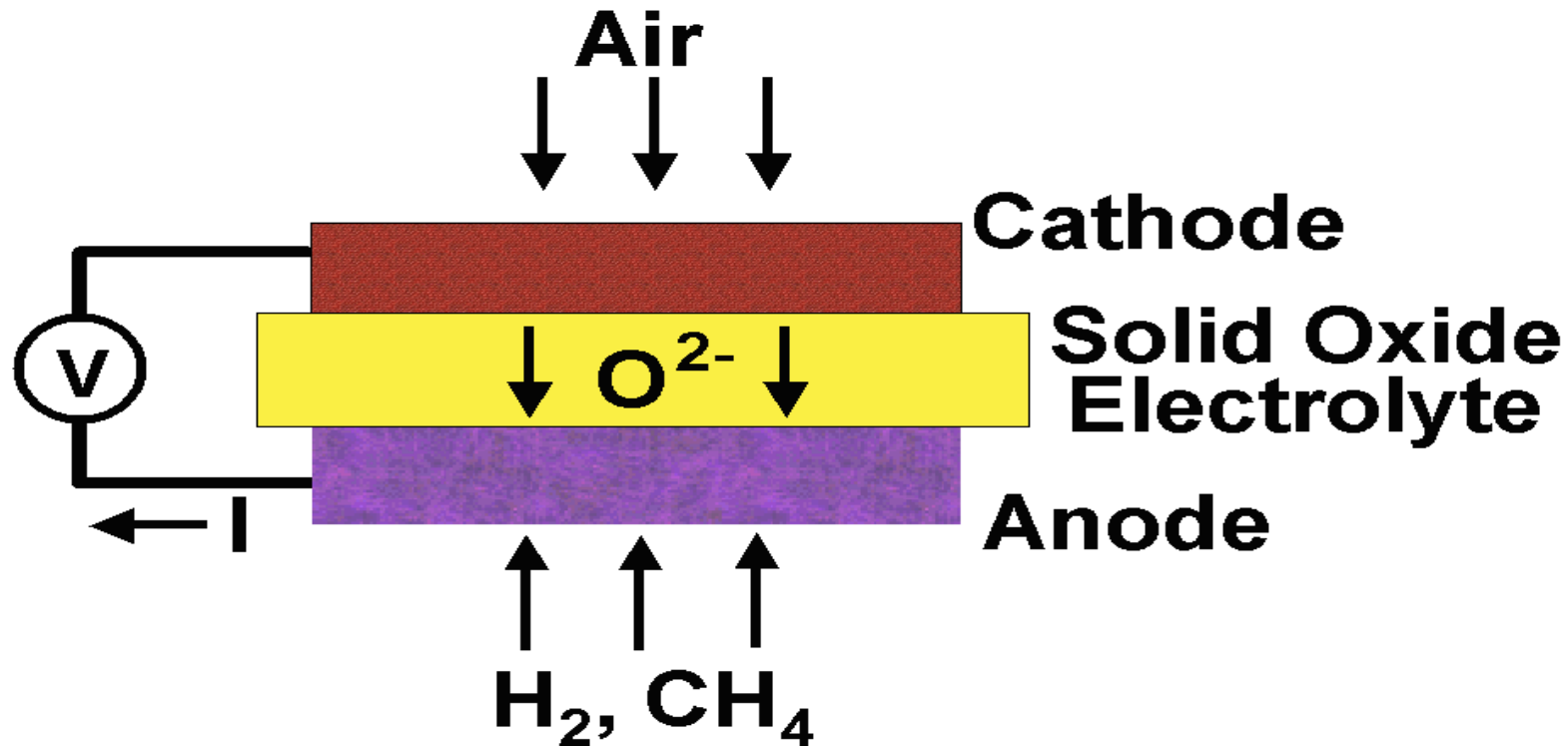
Vesinikutanklad (HT)

- **540 HT-d 2020. aastaks:** Japan 140, Saksamaa 90, Hiina 85, USA 85, Korea 83.
- Toimub eksponentsiaalne vesinikutehnoloogia laienemine maailma enim arenenud riikides.
- Aga Eestis ainult räägime, et oleks vaja kah liituda arenenud riikide perega.

2021-2022 Andretti Group
plaanib ehitada **100 HT-d**
USAs, 39 HT-d Californias.



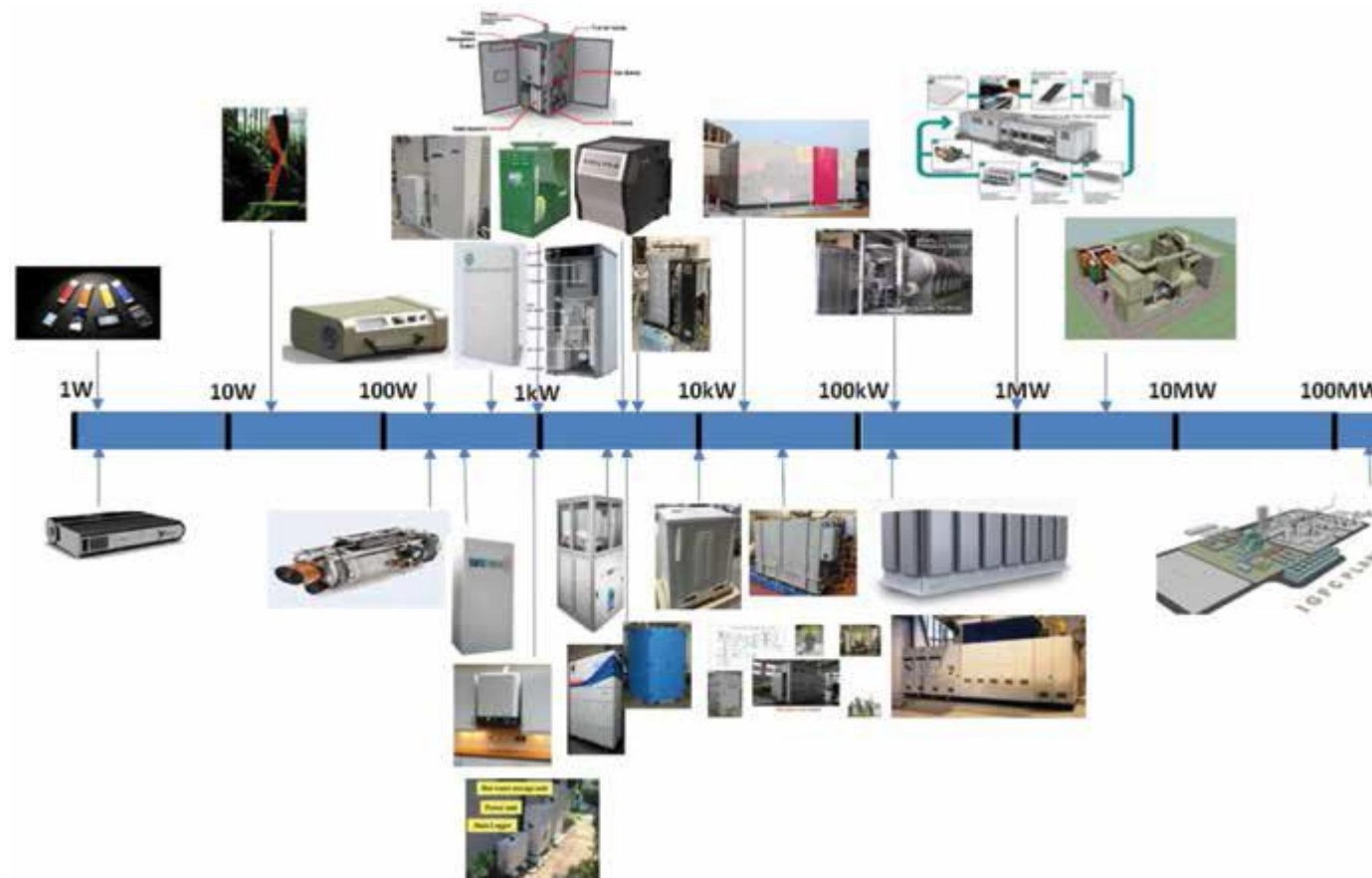
Tahkeoksiidne kütuseelement



- Tahkeoksiidne kütuseelement (SOFC), W.Nerst (1902-1907) , $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Nüüd $T=600\text{-}900\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Massiline kommertsialiseerimine eeldab hinda alla 500-700 USD /kW ja vähemalt 50 tuhat tundi stabiilset tööd
- Testid süsteemidega 900 USD/kW momendil
- 1.1GW statsionaarseid süsteeme: Bloom Energy, Google, Fuel Cell Energy, Doosan Fuel Cells, .Populaarsed Jaapani kodudes , kaubamajades ja väikeasumites,jne.



SOFc power systems (hardware demonstrators, prototypes and pre-commercial systems up to 200 kW, concepts at 20-200MW and above)



- 2,5-3,5 MW SOFC või 3,0-3,5 PEMFC.
- Optimeerimiseks
 - patareid 0,5-1,0 MW ja
 - superkondensaator 3,0-4,0 MW pidurdusenergia kogumiseks ja kiirendusenergia allikana.
- Ühe H₂ laadimisega 1000 km

Canadian Pacific announces hydrogen-powered locomotive pilot project



Bioenergy International

Storage & Logistics

December 20, 2020

Rail freight operator Canadian Pacific Railway Ltd (CP) has announced that it plans to develop North America's first line-haul hydrogen-powered locomotive. CP's Hydrogen Locomotive Program will retrofit a line-haul locomotive with hydrogen fuel cells and battery technology to drive the locomotive's electric traction motors.



Canadian Pacific Railway (CP) provides rail freight and intermodal transportation services across a 13 000-mile network, servicing major centres in Canada and the United States (US) carrying 2.8 million carloads in 2019. It has a network of more than 100 transload facilities linking key ports on both the west and east coasts offering the shortest route from Vancouver to the Midwest and from Toronto to Calgary (photo courtesy CP).

Once operational, CP will conduct rail service trials and qualification testing to evaluate the technology's readiness for the freight-rail sector.

Vesinikulaev

- **Merekütuste kasutamise direktiiv kehtestab 2024. a karmid normid laevadele, et vähendada CO₂ NO_x SO_x, VOC ja NP tootmist**
- Kuna 1000 tonni on vesiniku salvestamise ülempiir laevadel, siis uuritakse ka ammoniaagi kütuseelementide ehitamise võimalusi ja paigaldamist suurtele laevadele. Samas saab NH₃ väga lihtsalt termiliselt lagundada vesinikuks ja lämmastikuks.
- 2010-2015. a Wärtsila tegeles umbes samasuguse projektiga, kus analüüsiti SOFC paigaldamist jäälõhkujale. Kuid oldi vist ajast liiga palju ees ja järsku lõpetati see projekt ära

Ballard's Experience

Ballard's Marine Center of Excellence in Hobro, Denmark is dedicated to engineering, manufacturing and servicing fuel cell marine applications. Ballard is actively involved in a number of marine projects, including: megawatt-scale marine power solutions with ABB, development of HySeas III, the world's first sea-going renewables-powered car and passenger ferry; participation in Europe's H2PORTS project; and a Flagships project to demonstrate fuel cell powered ferries and barges.



Proven Solutions for Marine Vessels

Hydrogen fuel cell power—a proven zero-emission solution for powering transit buses, trucks and other heavy-duty transport—offers real potential for a variety of marine vessels. [Ballard provides modular, scalable FCwave™ fuel cell systems for ferries, barges and cruise ships.](https://www.ballard.com/markets/marine)

<https://www.ballard.com/markets/marine>



UNIVERSITY OF TARTU



Vesinikul, kütuseelementidel, patareidel ja
superkondensaatoritel baseeruv
energiatehnoloogia areneb ülimalt kiiresti.
On viimane aeg ka meil seda arendama hakata!

Täna tähelepanu eest!