



**TAL
TECH**

PÕLEVKIVIENERGEETIKA HEITMED JA UUED TEHNOLOOGIAD

Professor Alar Konist
Tallinna Tehnikaülikool, Energiatehnoloogia instituut

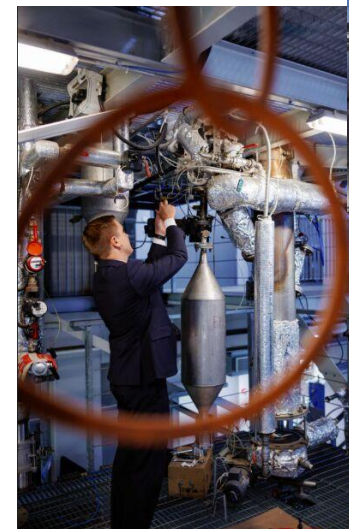
30. september 2026

JÄTKUSUUTLIKU ENERGEETIKA JA KÜTUSTE UURIMISRÜHM



Jätkusuutlike energiate ja
kütuste uurimisrühm

Juht: prof Alar Konist



TAL
TECH

Uurimisrühma liikmed....aga tegelikult rühmade vahel piire pole

Prof. Alar Konist
(alar.konist@taltech.ee)

Jätkusuutlike energiatega ja
kütuste uurimisrühma juht

Dmitri Nešumajev, PhD
Alejandro Lyons Ceron, PhD
Mais Baqain, PhD
Abhishek Agarwal, PhD
Serhii Brychka, PhD
Haochen Sun, PhD
ja Tõnu Pihu, PhD

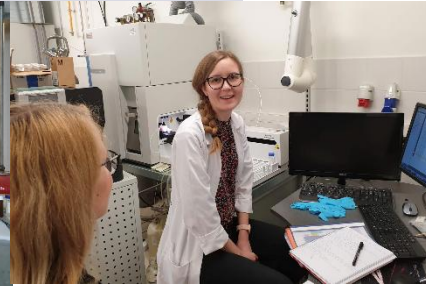
tippteadlased



Mari Sinisalu
Liisa-Maria Kaljusmaa
Fanfan Xu
Dan Yang
Hannela Artus
Laura Carolina Lyons Ceron
Ahmad Al Omari – tööstus

doktorandid

Märksõnad – kütused, põlemine, pürolüüs, gaasistamine, tuhk, süsinikmaterjalid, aktiveerimisenergia, H₂, CO₂-heitmed, CCS ja CCU (sh hanikus põletus)



PILOOTKEEVKIHISEADMED

Keevkihipürolüüsi seade

- ❑ Pürolüüsi ja kaas-pürolüüsi uuringud erinevate kütuste puhul.
- ❑ Integreeritud põlemis- ja pürolüüsisüsteem.
- ❑ Soojusvõimsus 50 kWth.



TGA-MS (mg)



Batch reaktor (g)



Pidevoolu reaktor (g)



Pilotseade (kg)



Erinevad tahked kütused, sealhulgas põlevkivi, biomassi, plastijäätmed ja nende segud

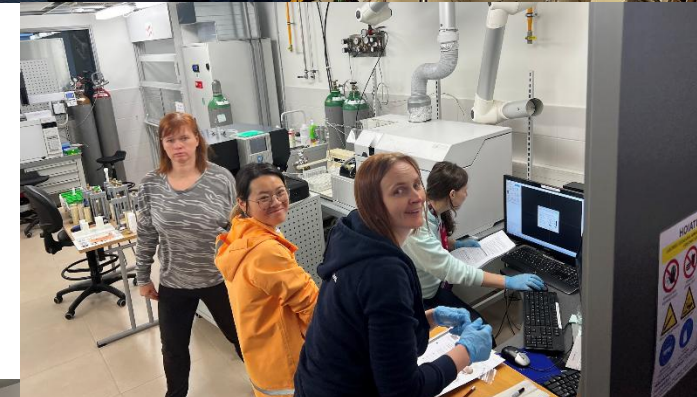


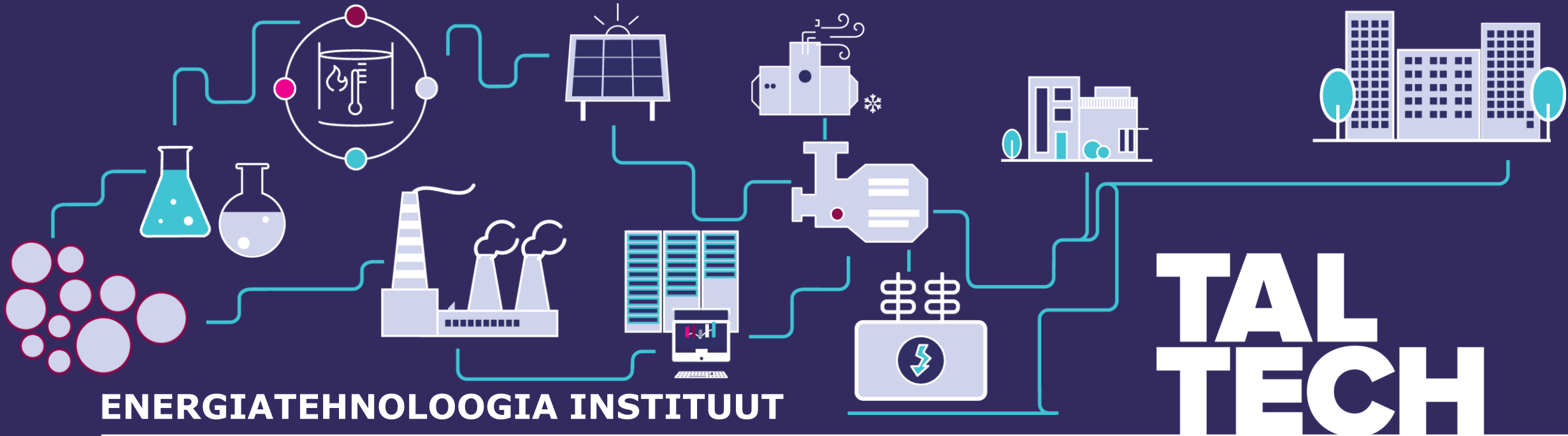
Tsirkuleeriva keevkihi põlemisseade (FCB)

- ❑ Põlemise ja oksükütuse põlemise uuringud.
- ❑ Võimaldab põletada põlevkivi, põlevkivi poolkoksi ja põlevkivi/plasti segusid.
- ❑ Reaalaegne gaasiheitmete analüüs.
- ❑ Soojusvõimsus 60 kWth.

UURIMISSUUNAD

- Keemia-, keskkonna- ja soojusinseneria
- Põlevkivitehnoloogiad (keevkihikatlad põlevkivitööstuses)
- Katlad, tuuleenergia, bioenergia, energiamajandus
- Kütuste termokeemiline muundamine
- Süsiniku püüdmine ja taaskasutus (CCU-CCS)
- Tuhk, aktiveerimisenergia, CO₂-heitmed
- Põlevkivi ja biomassi hapnikurikkamas keskkonnas koospõletus tsirkuleerivates keevkihikateldes (CFB)
- Ca-rikka tuha kasutamine kihimaterjalina CO₂ (samuti SO_x ja NO_x) sidumiseks biomassi keevkihipõletuses
- Põlemisprotsessi parameetrite labori- kuni pooltööstuslikul skaala katsed
- Lendtuha iseloomustamine
- H₂ ja selle salvestamine
- Poorsed süsiniknanomaterjalid
- LCA





PÕLEVKIVI JA -ENERGEETIKA

Mis on põlevkivi?

Põlevkivi on orgaanilist ainet ehk kerogeeni sisaldav settekivim. Kerogeen sisaldab peale süsiniku suhteliselt palju vesinikku ja hapnikku, veidike lämmastikku jt elemente nagu väävel ja kloor.



Põlevkivid, sõltuvalt leiukohtadest, erinevad aga oma tekkelt, koostiselt, kütteväärtuselt, õli saagiselt jne.

Põlevkivide mineraalosad võivad olla väga erinevad.

Erinevad põlevkivid

Colorado põlevkivi



Queenslandi põlevkivi



Eesti põlevkivi



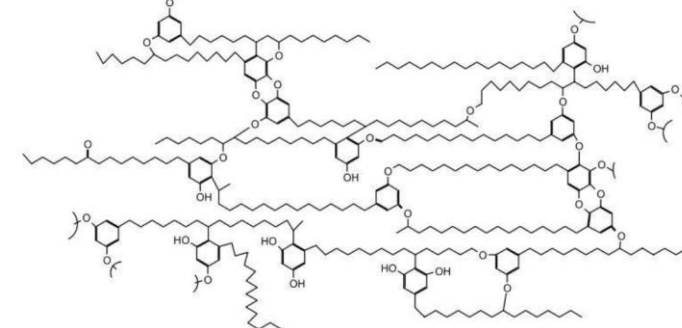
Brasiilia põlevkivi



Jordaania põlevkivi



KEROGEEN – põlevkivi kõrgmolekulaarne polüfunktsionaalne tahke orgaaniline aine, mille praeguseks väljakujunenud keemiline koostis ja struktuur on tulel lähteainest ning selle muundumisprotsessidest. Kerogeenil nagu ka põlevkivil on palju definitsioone ja klassifikatsiooni skeeme. Struktuur Ü. Lille uuringutest lähtuvalt:



Allikas: J. Schmidt. 2nd Oil Shale Conference

Põlevkivi tehnilised näitajad



Madal kütteväärtus

Suur tuhasisaldus

Kõrge CaO sisaldus tuhas

	Süsi	Pruunsüsi	Põlevkivi
Niiskus, %	5 - 13	10 - 30	10 - 12
Tuhk, %	5 - 25	15 - 25	43 - 47
Väävel, %	0,5 - 3	1 - 3	1,5 - 1,8
Kütteväärtus, MJ/kg	20 - 28	10 - 20	8 - 10

Põlevkivi orgaaniline ja mineraalne osa mõjutavad heidet



Orgaaniline osa

Põlemisel tekib fossiilne CO₂.

Karbonaatne mineraalosa

Lagunemine võib vabastada täiendavat CO₂.

Kaltsiumirikas tuhk

Seob väävlit ja pakub võimalusi mineraalseks kasutuseks.

NEJ tootmisvõimsused läbi aegade



1959-1966

BEJ 1624 MW



1969-1973

EEJ 1610 MW



2004-2005

CFB 2x215 MW



2005

BEJ 765 MW



2015

Auvere 300 MW

NEJ 2014

2380 MW

Toodang ~11 TWh

Enefit Energiatootmise Eesti ja Balti Elektriijaama tootmisvõimsused



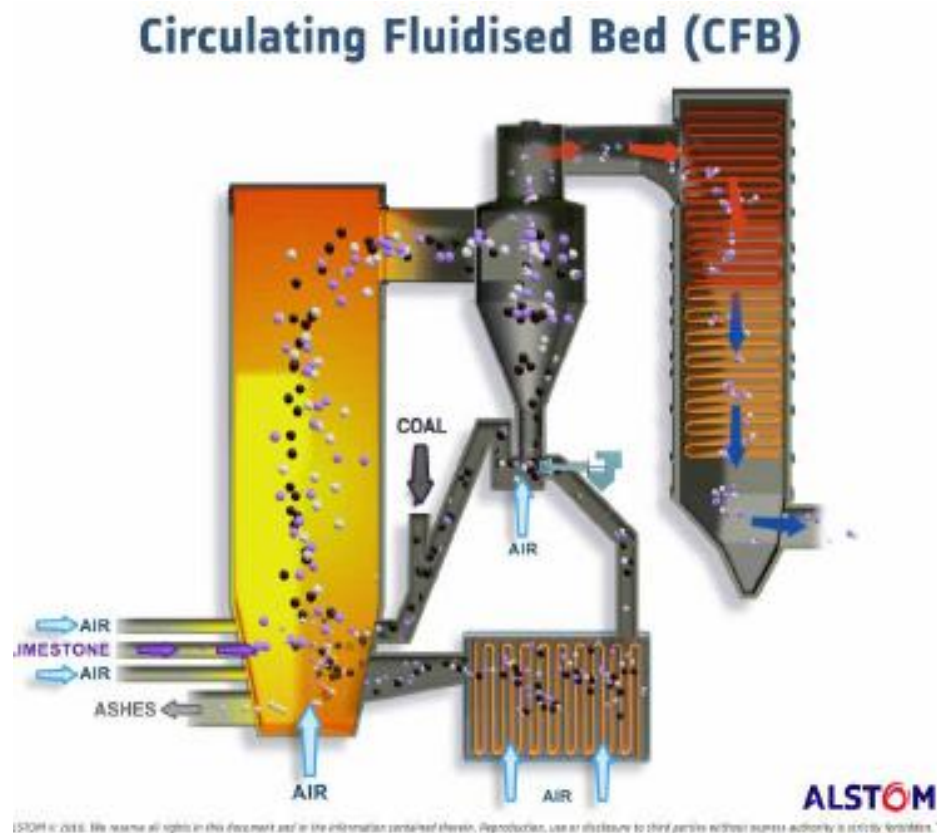
**TAL
TECH**



Auvere Power Plant



Keevkihtpõletus sobib Eesti põlevkivi omadustega



Madal ja ühtlasem temperatuur

Piirab termilise NO_x teket.

Pikk viibeaeg ja tahke aine ringlus

Toetavad põlemist ja soojusülekannet.

Kütuse enda kaltsium

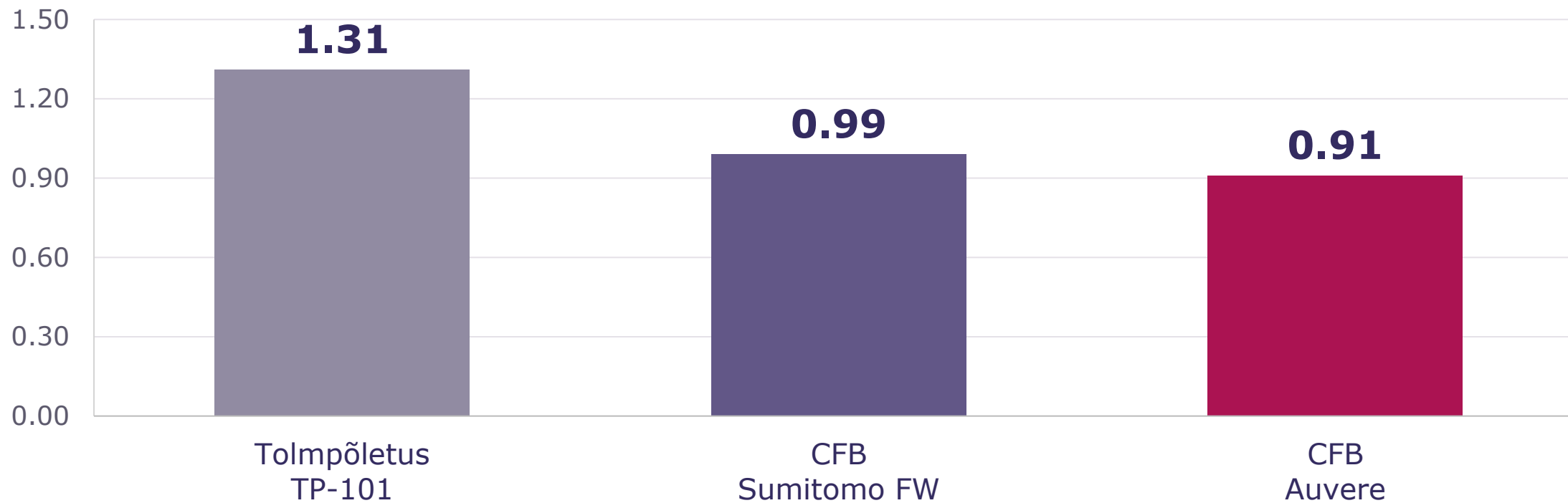
Võimaldab väävli sidumist koldes.

Õhusaaste vähendamine sõltub kütusest ja töörežiimist

Heide	Peamine mõjutegur	Vähendamise võimalus
SO ₂	Väävli ja kaltsiumi reaktiivsus	Väävli sidumine keevkihis
NO _x	Kütuselämmastik ja õhujaotus	Põlemise juhtimine, vajadusel järelpuhastus
Tolm ja peenosakesed	Tuha koostis ja gaasi jahenemine	Filtrid, püüdeseadmete töökindlus
CO ja orgaanilised ühendid	Põlemistingimused, käivitused, madal koormus	Segunemine ja sobiv tööpiirkond

Tehnoloogia areng vähendas põlevkivielektri eriheidet

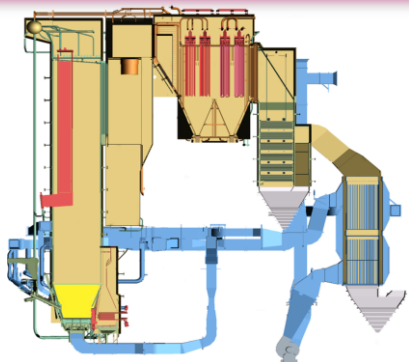
CO₂ eriheide, t CO₂/MWh elektrit



Auvere võrdlusnäit oli ligikaudu 31% väiksem kui TP-101-l

Põlevkivi ja poolkoksi põletamise tehnoloogia areng

FW CFBC katel 2004-2005



CFB, Narva, E08, B11

$p = 13,3 \text{ MPa}$

$t = 535 / 535 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Katel - $\eta \sim 91\%$

$\eta \sim 36\%^*$

GE CFBC katel 2018



CFB, Auvere 300 MW

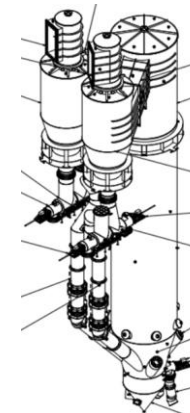
$p = 17,8 \text{ MPa}$

$t = 543 / 568 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Katel - $\eta \sim 91\%$

$\eta \sim 40\%^*$

Outotec CFB kolle 2015



CFB integrated into shale oil production , Enfit-280

Semi-coke feed: $483 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 556 t/h (semi-coke +
circulating ash 400 t/h), $\text{HV} < 1 \text{ MJ/kg}$

C 2.21; H 0.14; S 0.33

Heat input ca 150 MW Enfit280

**TAL
TECH**

SO₂
NO_x
PM

PC Boiler

400 / 2000
200 / 300
<2 / < 200

CFBC Boiler

0 – 40
90 – 170
<10 / < 20

Units

mg/Nm³
mg/Nm³
mg/Nm³

~~deSO_x~~
~~deNO_x~~

ESP
and/or
FF

CO	200 mg/Nm ³
SO ₂	10 mg/Nm ³
NO _x	200 mg/Nm ³
Dust	30 mg/Nm ³
TOC	10 mg/Nm ³

(*) – Energy unit efficiency

Suurem biomassi osakaal muudab kogu ploki töötingimusi



Kütuse etteanne ja niiskus

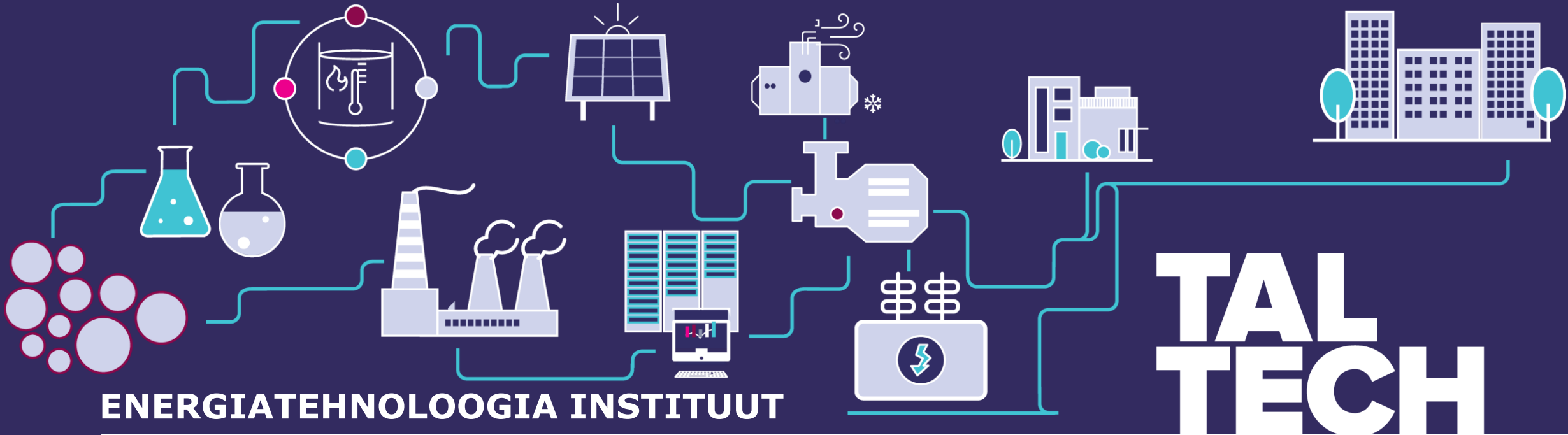
Vajalik on piisav mahuline läbilaskevõime.

Soojusülekanne ja tuhaärastus

Muutuda võivad küttepinnad, koldepõhi ning abisüsteemid.

Keskkonnatulemus ja majandus

Vajavad kestliku tarneahela ning uue heiteprofiili hindamist.



LÄHITULEVIKU VÕIMALUSED

CO₂ püüdmise põhivalikud põlevkivienergeetikas

Lahendus	Põhimõte	Peamine integreerimise küsimus
Järelpüüdmine (nt amiinid)	CO ₂ eraldamine suitsugaasist	Auru vajadus, eelpuhastus ja lahusti käitumine
Hapnikus põletamine	Õhu asemel O ₂ ja ringluses suitsugaas	Hapniku tootmine, õhulekked ja soojusülekanne
Arenevad protsessid	Kaltsiumi- või hapnikukandja ringlus	Materjali vastupidavus ja skaala suurendamine

Katsetulemus peab jõudma kogu ploki töökindla lahenduseeni

CO₂ ERIHEITMED – VÄHENDAMISE VÕIMALUSED

Auvere: 305MW_{el}
Kasutegur: 40%

100%
põlevkivi

CO₂
990 kg/MWh_{el}

CO₂
498 kg/MWh_{el}

CO₂
505 kg/MWh_{el}

CO₂
140 kg/ MWh_{el}

CO₂
-383 kg/MWh

CO₂
-496 kg/MWh

CO₂
827 kg/ MWh_{el}

CO₂
416 kg/ MWh_{el}

50%* põlevkivi
+
50% biomass

50%* põlevkivi
+
50% NH₃

100%
Põlevkivi
+CCS

50%/50%
Põlevkivi/Bio
+CCS

50%/50%
Põlevkivi/Bio
50% tuhast
tsemendiks
+CCS

100%
põlevkivi
+
50% tuhast
tsemendiks

50%* põlevkivi
+
50% biomass
+
50% tuhast
tsemendiks

* -Soojuse järgi

Biomass koos CCS-iga võib anda negatiivse netoheite

– 383

kg CO₂-ekv/MWh netoelektrit

50% põlevkivi ja 50% hakkpuidu
ning hapnikus põletamise arvutusnäide

Kestlik biomass

Tarneahela ja maakasutuse mõju kuulub bilanssi.

Toimiv püük ja püsiladustamine

Biogeense süsiniku eemaldamine peab ületama jääkheite.

Kogu elutsükli kontroll

Tulemus on stsenaariumipõhine.

CO₂ ERIHEITMED – VÄHENDAMISE VÕIMALUSED

Enefit 280:
Põlevkivi 280 t/h



~ 0,5 Mt aastas
~1,9 t/t_{õli}



100%
põlevkivi

~ 0,05 Mt aastas
~0,19 t/t_{õli}



100%
Põlevkivi
+CCS

~ 0,14 Mt aastas
~0,51 t/t_{õli}



100%
põlevkivi
+
50% tuhast
tsemendiks

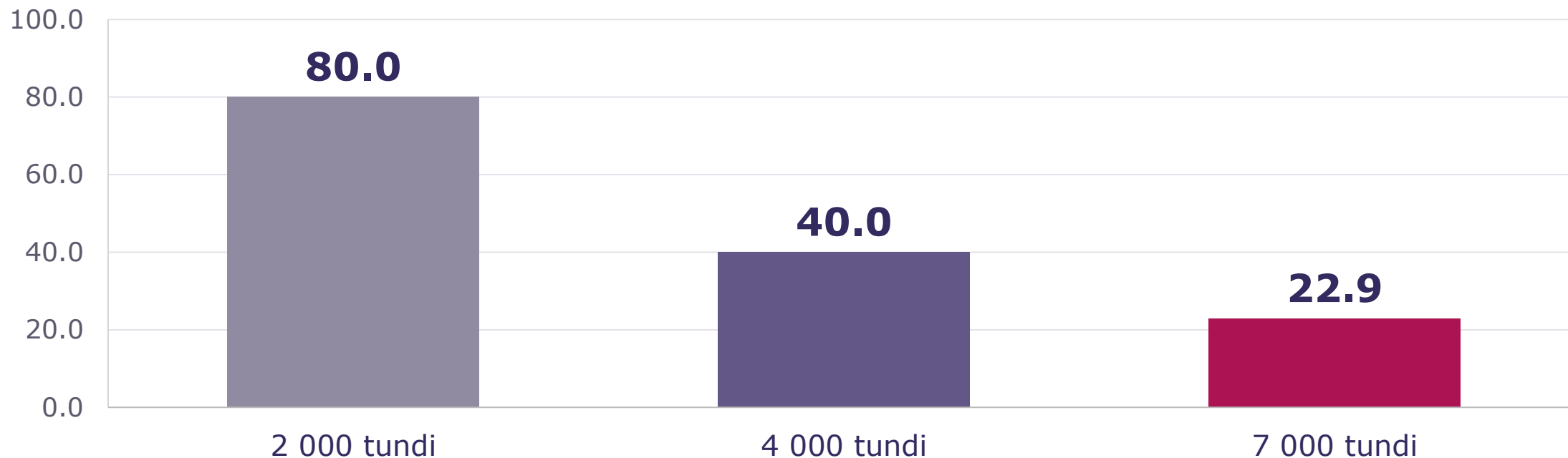
~ -0,32 Mt aastas
~ -1,19 t/t_{õli}



100%
põlevkivi
+
50% tuhast
tsemendiks
+CCS

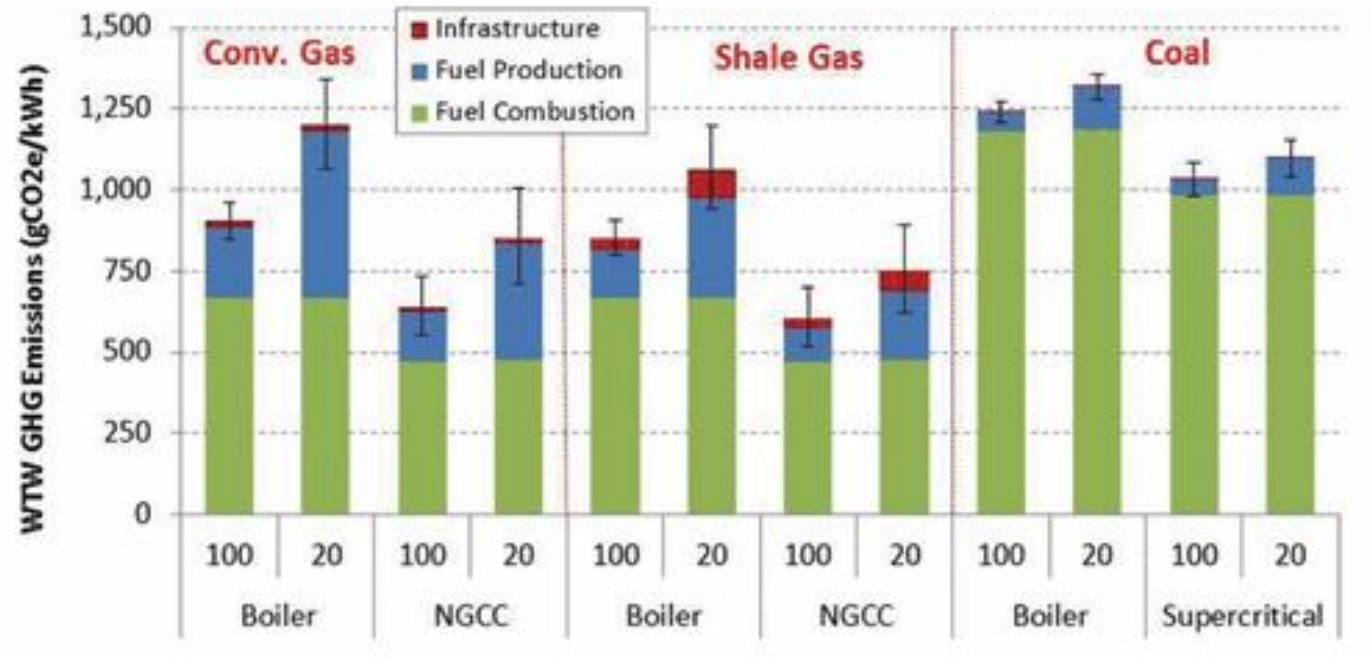
Aastane kasutusaeg mõjutab tugevalt ühikukulu

Püsikulu elektriühiku kohta, €/MWh



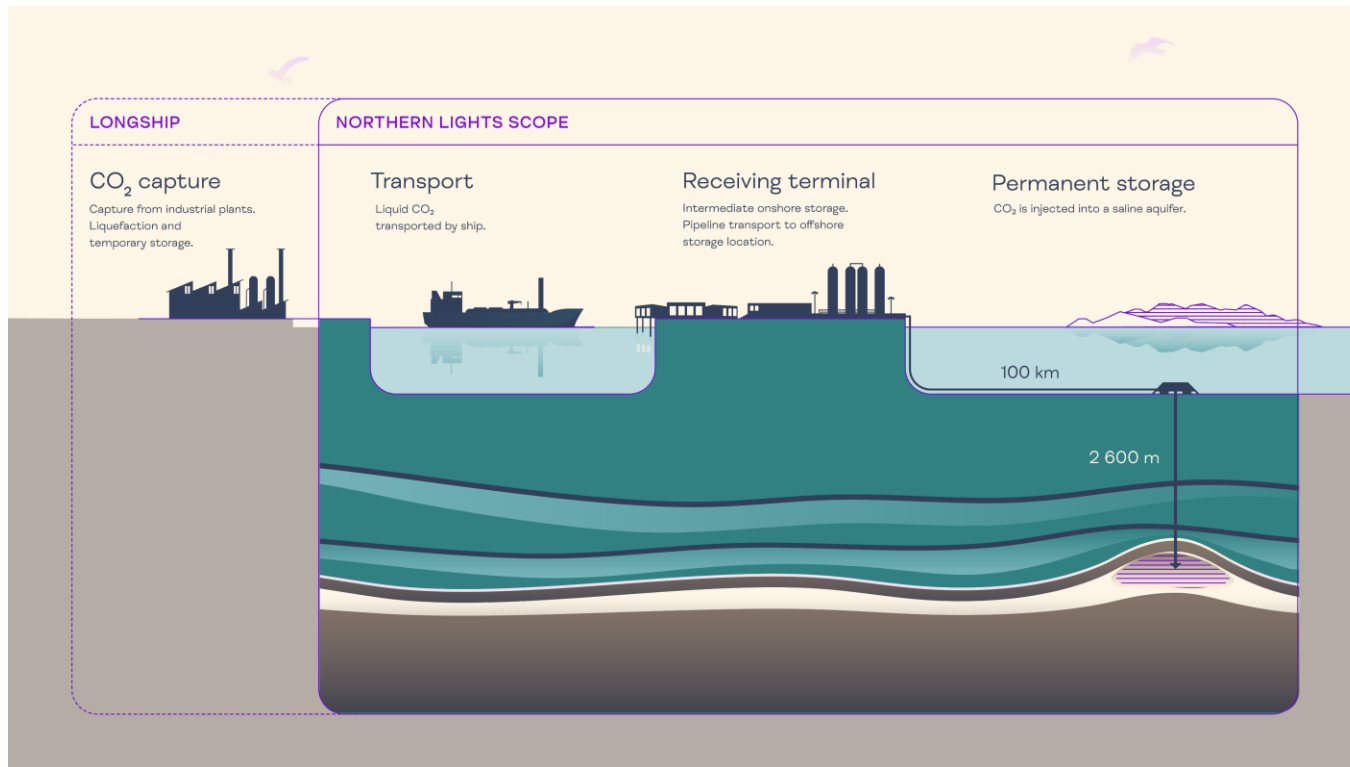
Pikaajaline elektriostuleping võib vähendada tuluriski

CO₂ heitmed maagaasi, kildagaasi ja söe kasutamisel elektritootmiseks. Siit on näha, et täna maagaasil ja kildgaasil ei näidata kütuse tootmisel tekkivat CO₂ emissiooni.



Burnham, A., Han, J., Clark, C.E., Wang, M., Dunn, J.B. and Palou-Rivera, I., 2012. Life-cycle greenhouse gas emissions of shale gas, natural gas, coal, and petroleum. *Environmental science & technology*, 46(2), 619-627.

CO₂ ladustamise ahel töötab juba Põhjamerel



1,5 miljonit tonni aastas

Northern Lightsi esimese etapi võimsus.

Vähemalt 5 miljonit tonni aastas

Laienduse kavandatud võimsus.

Eesti projekti küsimus

Terminal, transport, CO₂ kvaliteet ja ladustusleping.

CCU ja tuha kasutus vajavad tõendatud elutsükli tõestust



Mineraalne sidumine ja ehitusmaterjalid

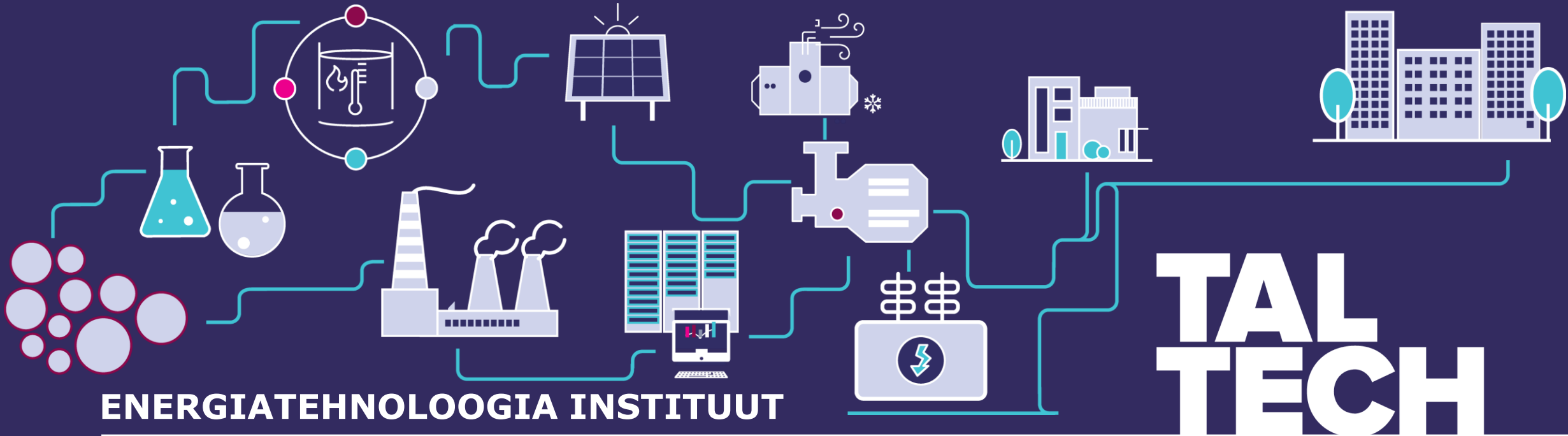
Võimalik pikaajaline CO₂ sidumine ning toorme asendamine.

Kütused ja kemikaalid

Kliimamõju sõltub energiast ja CO₂ hilisemast vabanemisest.

Toote kvaliteet ja turumaht

Määravad, kui suurt osa tuha- või CO₂-voost saab kasutada.



UUED TEHNOLOOGIAD



Kaasrahanud
Euroopa Liit



Eesti
tuleviku heaks

TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOO

Kaks viisi kohalike ressursside väärandamiseks

Vesinikurikas sünteesgaas, kasulik soojus, CO₂ käitlemine ja mineraalsete jääkide väärandamine

TEM-TA205 Kohaliku puidu ja jäätmete täiustatud väärandamine süsinikuringluseks ning soojuse ja vesiniku tootmiseks

Sorptsiooniga tõhustatud gaasistamine kaltsiumiringlusega

Ringsed Ca-põhised sorbendid, CO₂ püük reaktoris ning biomassi ja jäätmetest saadud toorme katsetamine pilootseadmel.

Rahastus 810 000 € | 36 kuud | 09.2026–08.2029



TEM-TA73 Põlevkivi väärandamine tööstuse tooraineteks

Biomassi ja mineraalainerikka põlevkivi keemiline ringgaasistamine

Toorainete vastastikmõju, hapnikukandjate redokskäitumine ning kahe- ja kolmekomponentsete kütusesegude sünergia.

Rahastus 1 107 945 € | 58 kuud | 03.2024–12.2028



TEM-TA205 | Sorptsiooniga tõhustatud gaasistamine kaltsiumiringlusega

Rakendusele suunatud arendus ringmajanduse toormest pilootkatseteni

KOGURAHASTUS

810 000 €

PROJEKTI PERIOOD

09.2026–08.2029

TEHNOLOOGIA KÜPSUS

TRL 4 → TRL 5

TÖÖPAKETID

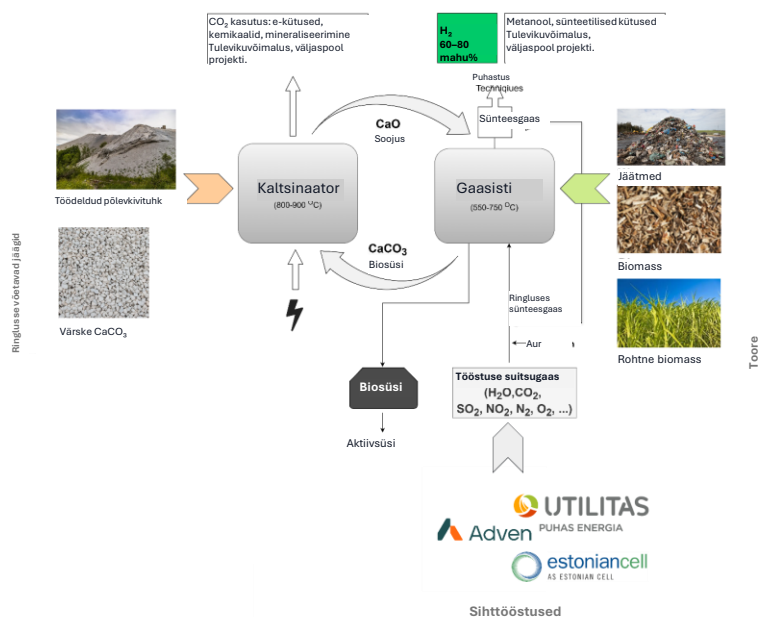
6 seotud tööpaketti



Kaasrahanud
Euroopa Liit



Eesti
tuleviku heaks



Ühendatud SEG-CaL-lahendus

Biomass +
jäägid

SEG-gaasisti

Gaasistamine +
CO₂ sidumine reaktoris

CaO + CO₂ → CaCO₃

H₂-rikas
sünteesgaas

Aur + ettevalmistatud
suitsugaas

Soojus +
tahke süsinik

Kaltsinaator / regeneraator
CaCO₃ → CaO + CO₂

Põhisõnum

- Biomass ja jäätmetest saadud toore kohalike ringressurssidena.
- Ca-põhised sorbendid, sh põlevkivituhk ja muud Ca-rikkad jäägid, CO₂ sidumiseks reaktoris.
- Gaasistamise ja kaltsiumiringluse ühendamine H₂-rikka sünteesgaasi ning soojust tootmiseks.
- Pilootkatsed ning CO₂, tahke süsiniku ja kasutatud sorbentide väärimine tööstuse tarbeks.



TALLINNA
TEHNIKAKÕRGGKOL
TTK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

TEM-TA73 | Keemiline ringgaasistamine

Redoksprotsessidel põhinev H₂-rikka sünteesgaasi tootmine ja mineraalsete jääkide väärindamine



Kaasrahastanud
Euroopa Liit



Eesti
tuleviku heaks

RAHASTUS

1 107 945 €

KESTUS

03.2024–12.2028

PÕHITEGEVUS

Pilootseadme
projekteerimine ja rajamine

HAPNIKUKANDJAD

Fe₂O₃, CaSO₄ ja põlevkivituhk



Põlevkivi väärindamine tooraineteks tööstustele

e-kütused
Metanool
Dimetüülkarbonaat



Rafineerimine

H₂

CO₂

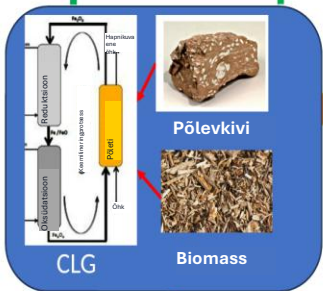
Süsinik-
nanotorud

Eesti Energia



TAL
TECH

TALLINNA TEHNIKALIKOOL



Soojus

Soojus
(nt kaugkütteks)

Tuhk

Tsement

CO₂-heide väheneb 10–40%
ühe tonni tsemendi kohta



KLIIMAMINISTEERIUM

Keemilise ringgaasistamise protsess

Kütusereaktor

Biomass ja põlevkivi
reageerivad
hapnikukandjaga

Oksüdatsioon ja regeneereimine

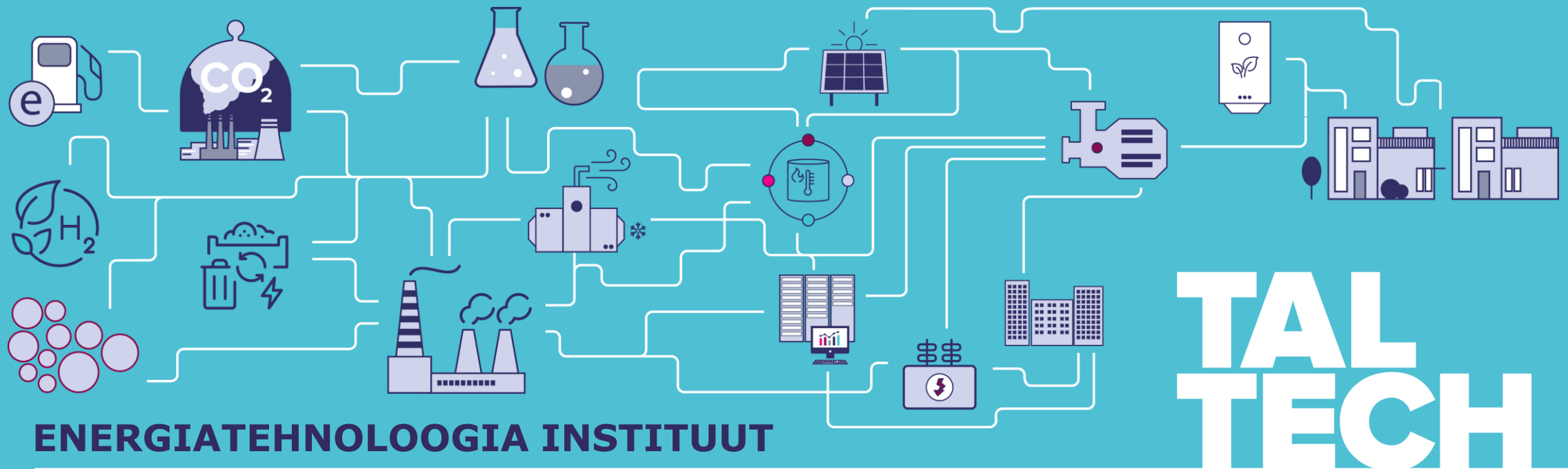
Redutseeritud kandja naaseb
kütusereaktorisse

Hapnikukandja redokstsükkel

H₂-rikas sünteesgaas | CO₂-rikas voog | kasulik soojus | tuhktsemendiks või toormeks

Põhisõnum

- Biomass ja mineraalainerikas põlevkivi teineteist täiendava kohaliku toormena.
- Hapnikukandjad osalise oksüdatsiooni juhtimiseks ja sünteesgaasi tekke soodustamiseks.
- H₂, CO₂, soojuse ja tuha kasutamine suurema lisandväärtusega tööstusrakendustes.
- Energiajulgeoleku ja ressursside ringkasutuse toetamine.



AITÄH KUULAMAST!