METK

Nähtamatu maailm meie ümber: kuidas muld mõjutab kliimat ja tulevikku?

14.02.26

Evelin Pihlap
evelin.pihlap@metk.agri.ee

Maaelu Teadmuskeskus
Tartu Ülikool

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

TUM

Yale Earth & Planetary Sciences

UNIVERSITY OF ILLINOIS URBANA-CHAMPAIGN

University of Sheffield

Kui me mõtleme mulla peale, mis esimesena silme ette tuleb?

Poodides saadav must muld

Mulla otsesed hüved meie toidulaual

Allikas: Valley AG

Viljapõllud

Allikas: aimintang/Getty Images

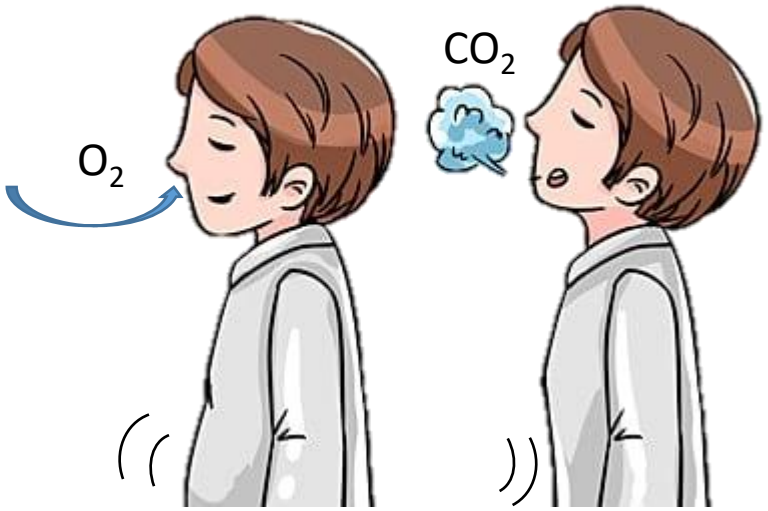
Aiamaa

Aga see on mündi ainult üks külg, sest muld on palju võimekam

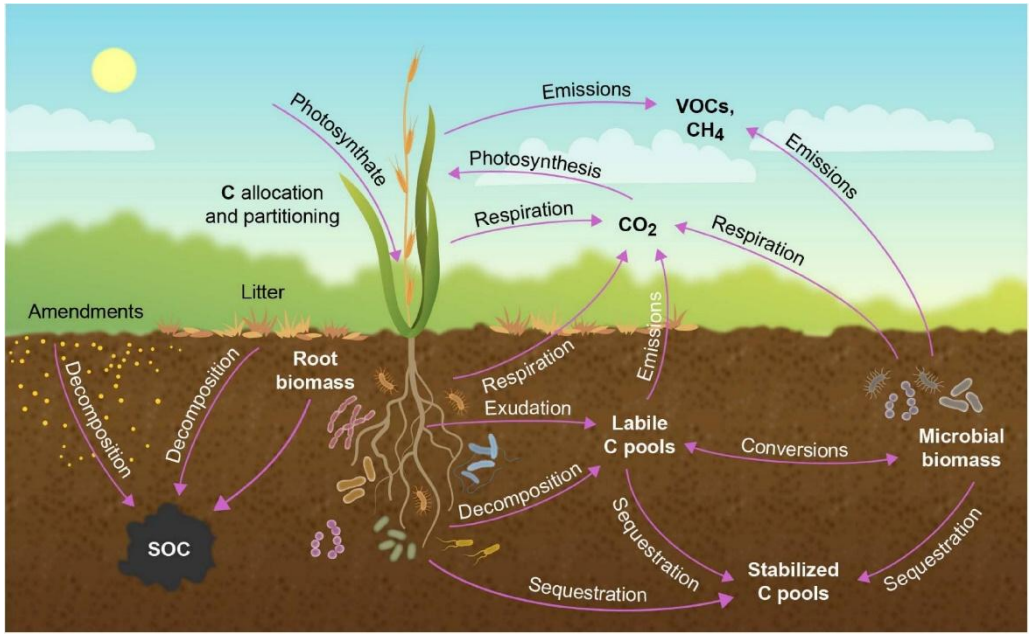
Mis saladusi muld meie eest peidab?

Garcia-Franco, et al. 2020

Sama moodi nagu hingab inimene, hingab ka muld. Aga natukene teistmoodi ☺

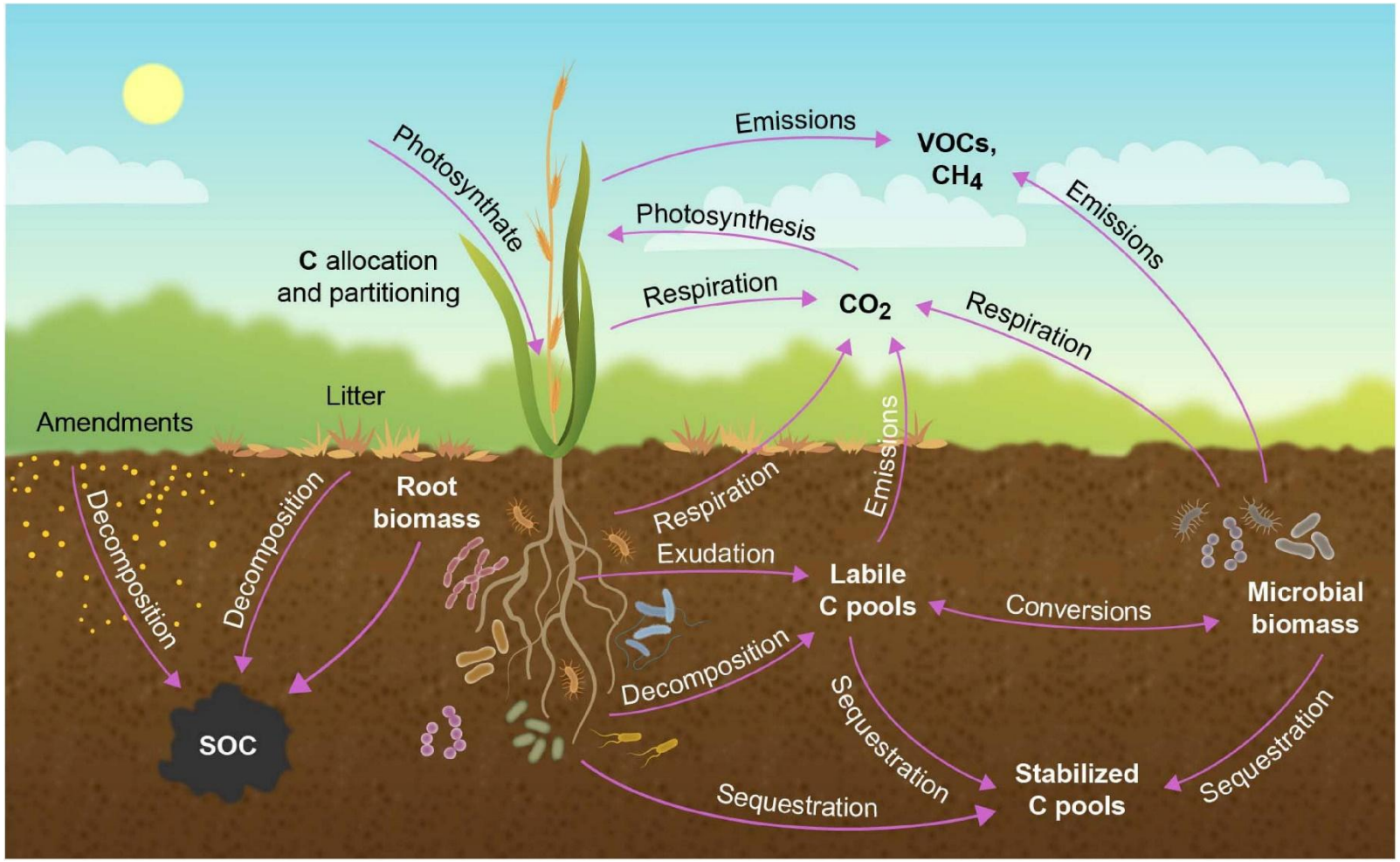


Allikas: pngtree



Jansson et al., 2021 (Front. Plant Sci.)

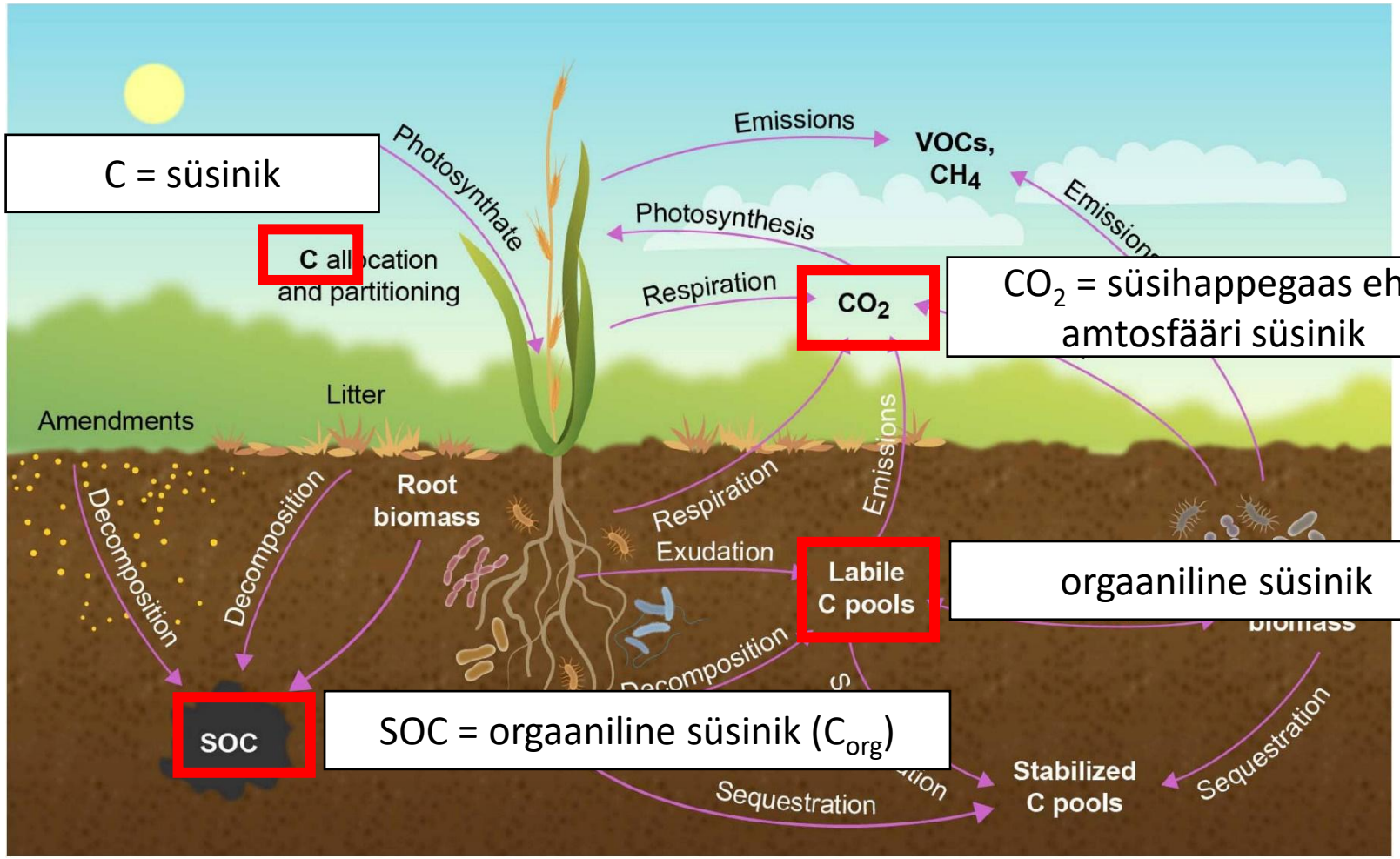
Mulla süsinikuringe



Mis seal mullas siis toimub?

Jansson et al., 2021 (Front. Plant Sci.)

Mulla süsinikuringe



C = süsinik

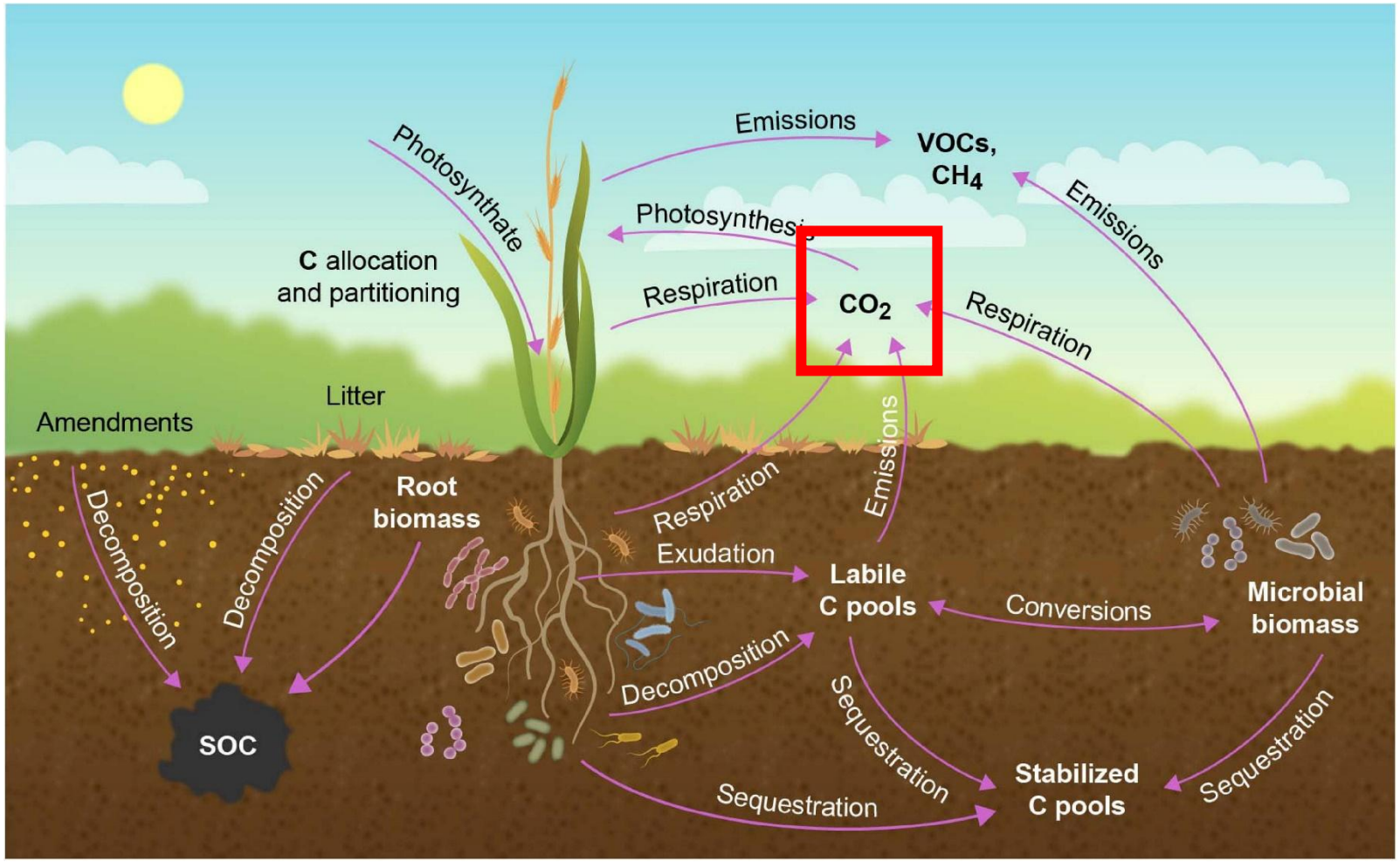
CO_2 = süsihappegaas ehk amtosfääri süsinik

orgaaniline süsinik

SOC = orgaaniline süsinik (C_{org})

Jansson et al., 2021 (Front. Plant Sci.)

Mulla süsinikuringe

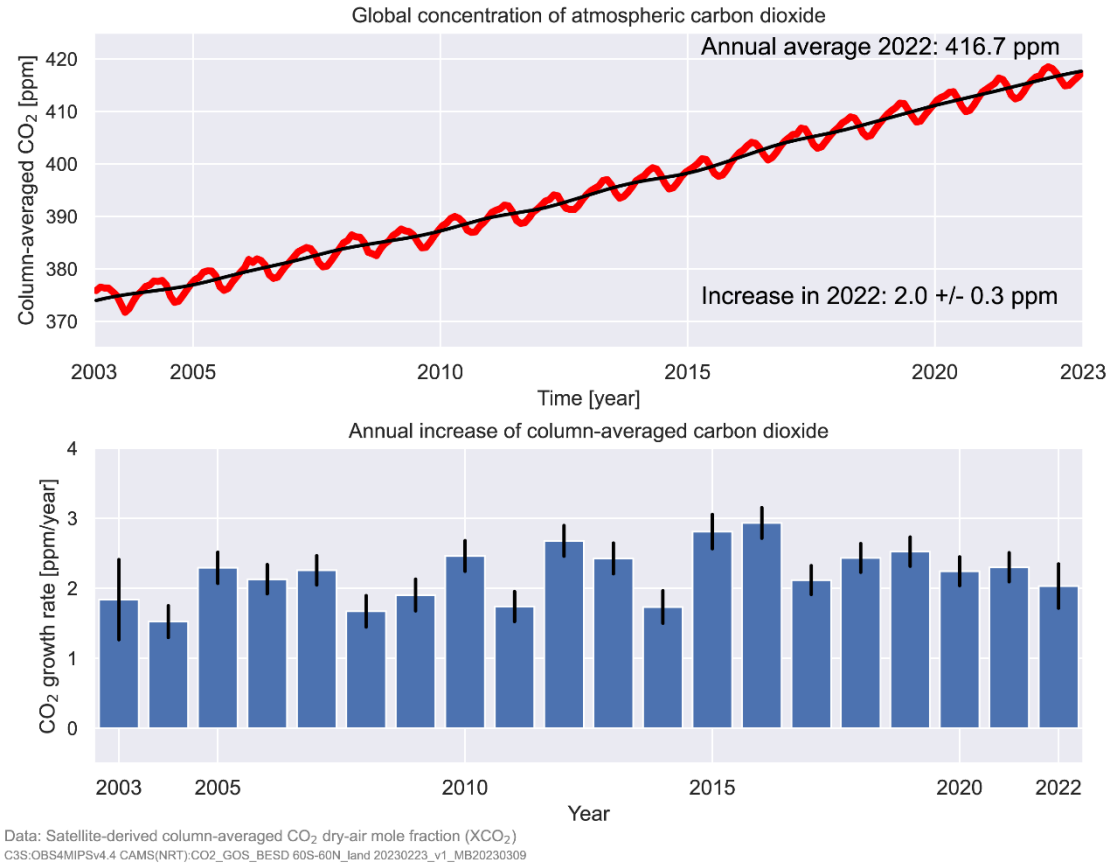


Süsiniku liikumine ökosüsteemis, kus amtosfääris olev CO_2 tarbitakse ning liigub edasi erinevate komponentide vahel

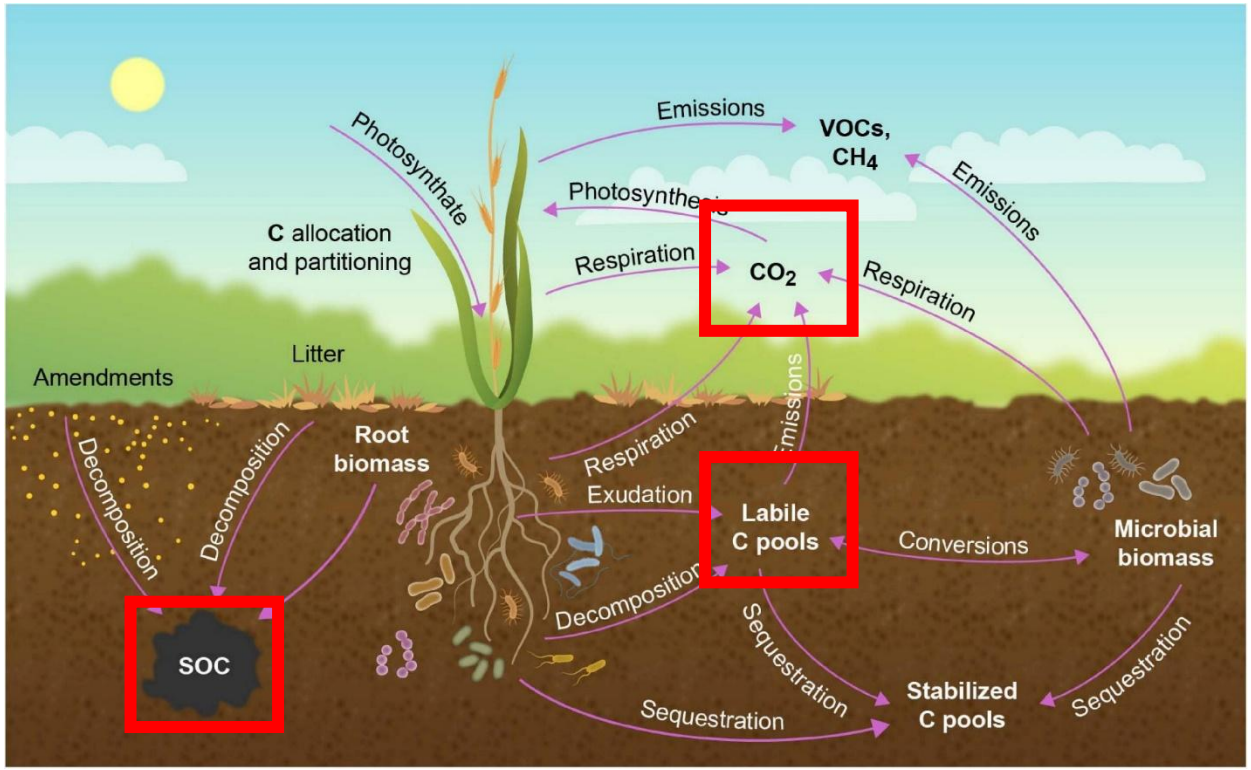
Lihtsas keeles: süsinik on pidevas liikumises

Jansson et al., 2021 (Front. Plant Sci.)

Selline süsinikuringlus on oluline komponent kliimamuutuste kontekstis



https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/greenhouse-gas-concentrations



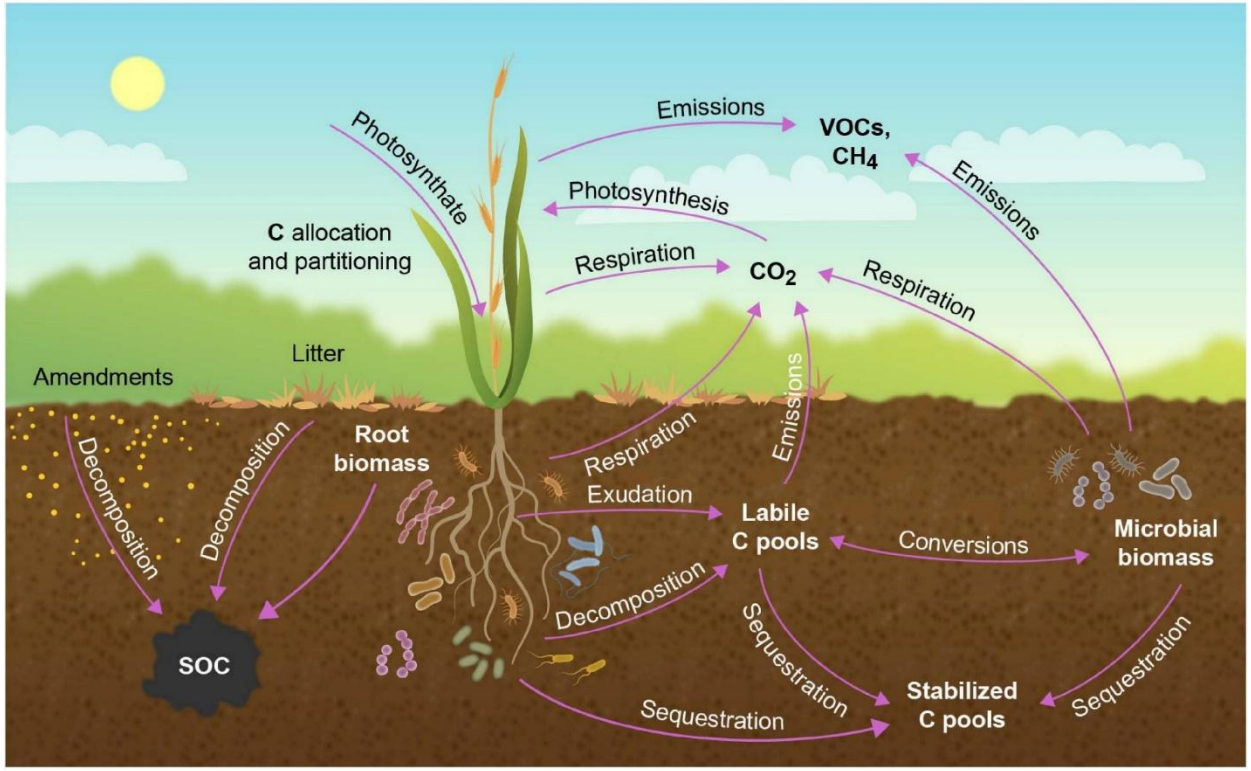
Jansson et al., 2021 (Front. Plant Sci.)

Selline süsinikuringlus on oluline komponent kliimamuutuste kontekstis

Sisend – Väljund = Süsiniku (C) talletamine

C sisend < C väljund = C kadu

C sisend > C väljund = C talletamine



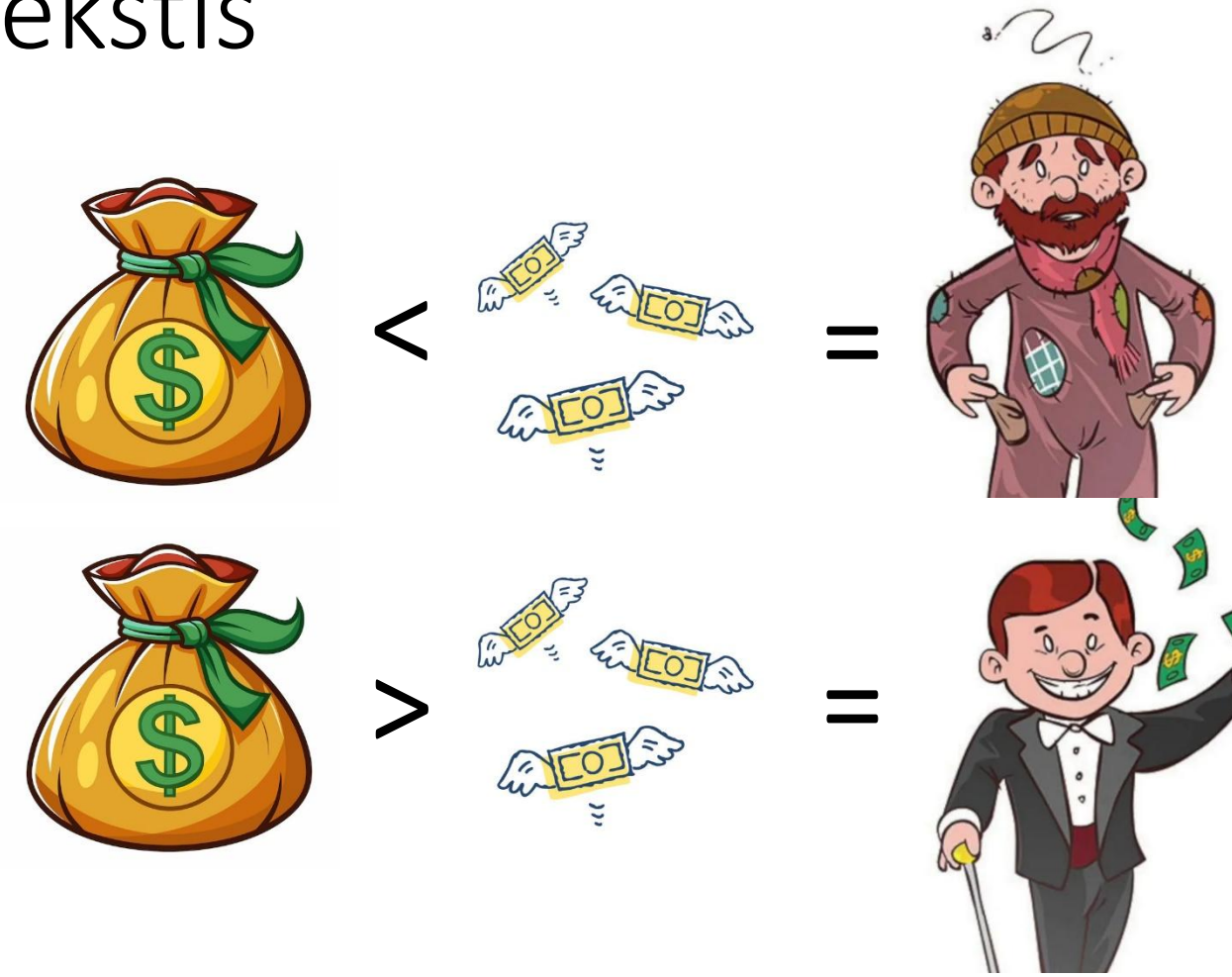
Jansson et al., 2021 (Front. Plant Sci.)

Selline süsinikuringlus on oluline komponent kliimamuutuste kontekstis

Sisend – Väljund = Süsiniku (C) talletamine

C sisend < C väljund = C kadu

C sisend > C väljund = C talletamine



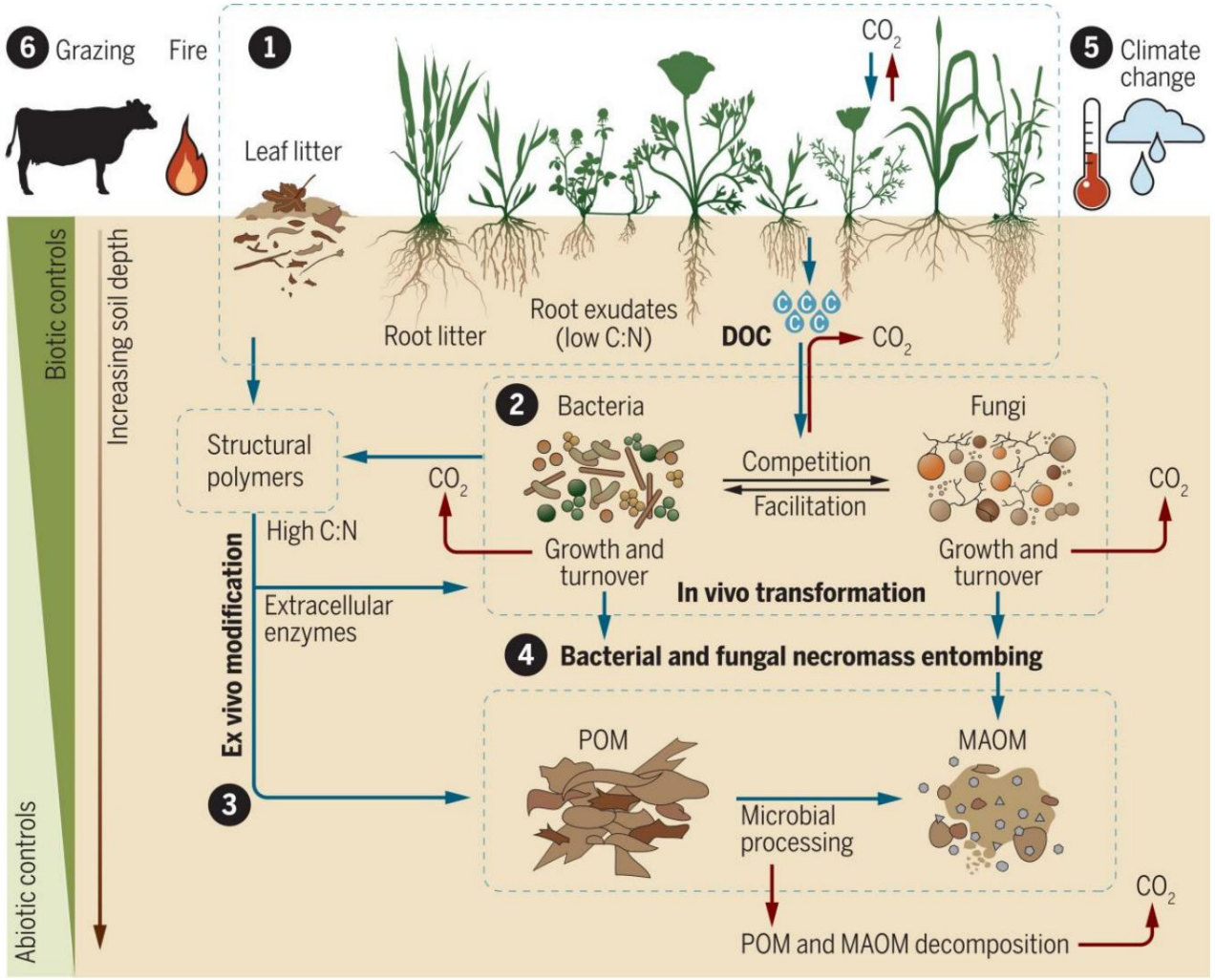
Orgaaniline süsinik mullas ei ole staatiline

- Mulda talletatakse orgaaniline süsinik
- Orgaanilise süsiniku sisaldus mullas on ajas muutuv

C sisend < C väljund = C kadu

C sisend > C väljund = C talletamine

See, kas me C_{org}-i sisaldust suurendame või kaotame, sõltub tasakaalust sisendite ja väljundite vahel



Kuang, 2024 (Scientific Journal of Technology)

Kõige suurem mõju põllumaadel muldadele tuleneb harimispraktikatest

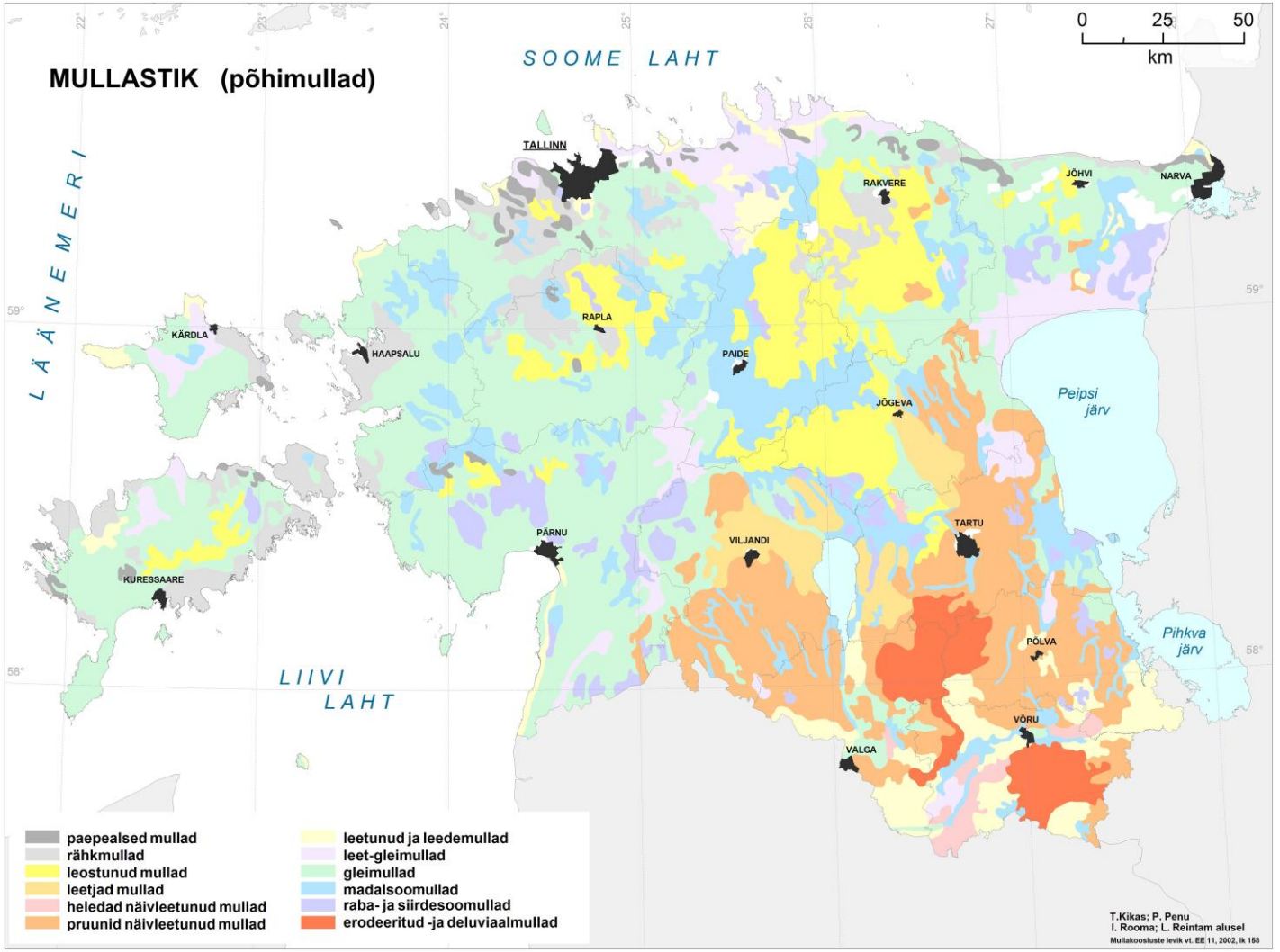
- Põllumajandusmaadel luuakse kultuurtaimede eksisteerimiseks vajalikud tingimused:
  - Kuivendamine
  - Lupjamine
  - Orgaaniliste ja mineraalväetiste kasutamine

Iga inimtegevus avaldab mullale mõju.

Ulatuse määr sõltub majandamise intensiivsusest ja praktikatest.

Mullastiku kaardi uuendamine

- Eesti võib väga uhke olla mullastiku kaardi üle.
- Aga… inimtegevus on oma töö teinud



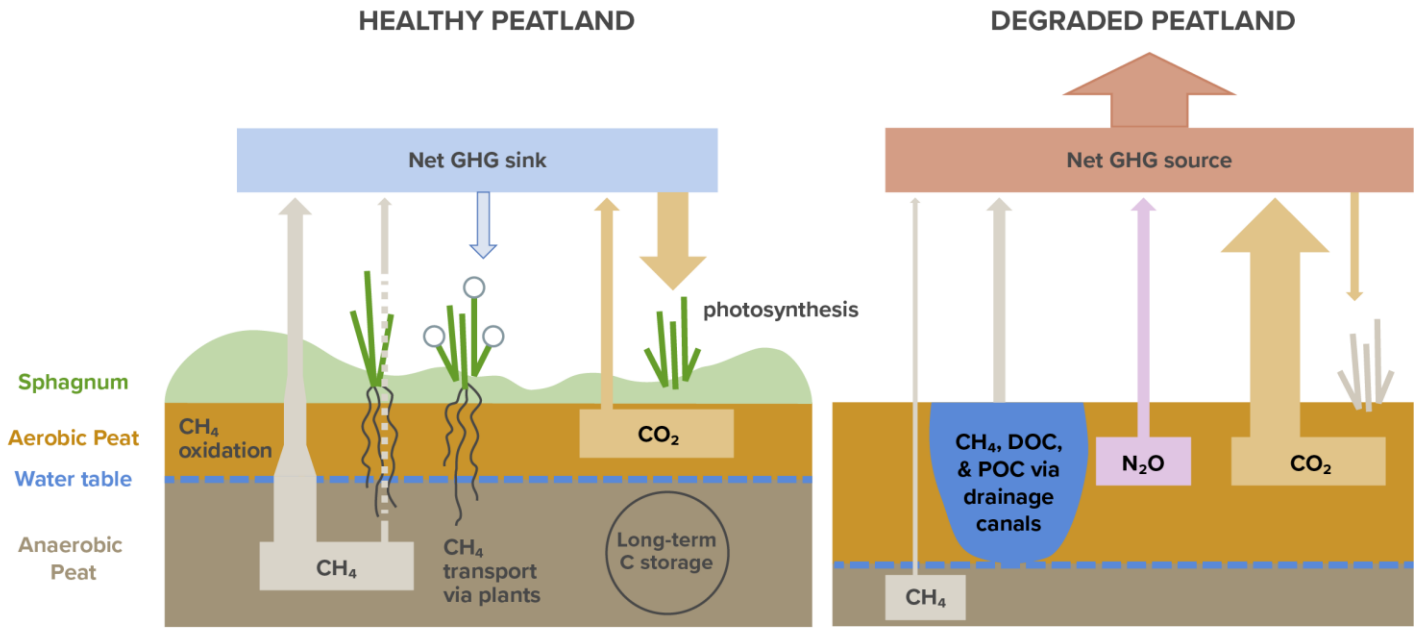
Mullastiku kaardi uuendamine

- Eestis on kõige intensiivsem kuivendamise mõju nähtav turvasmuldadel
- Turvasmuldade kuivendamine suurendab O_2 sisaldust -> turvas hakkab lagunema
- Sisend < Väljund

- Mida see endaga kaasa toob?

- Turvasmuldade kadu

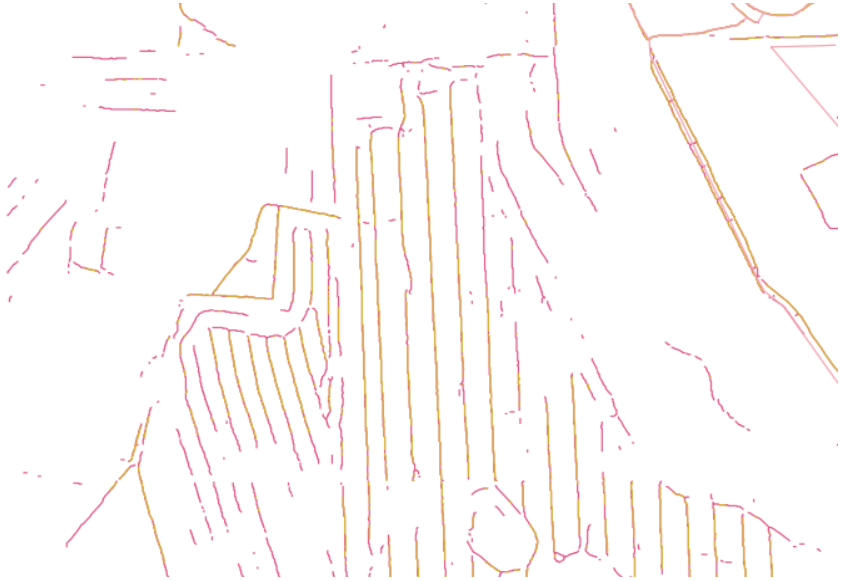
Inimtegevus muudab pikaajalise sidumise GHG emissiooniks.



Key: CO_2 (carbon dioxide), N_2O (nitrous oxide), CH_4 (methane), POC (particulate organic carbon), DOC (dissolved organic carbon)

Allikas: IUCN UK Peatland Programme. (2024, July 10). New briefing addresses the peatlands and methane debate.

Mullastiku kaardi uuendamine



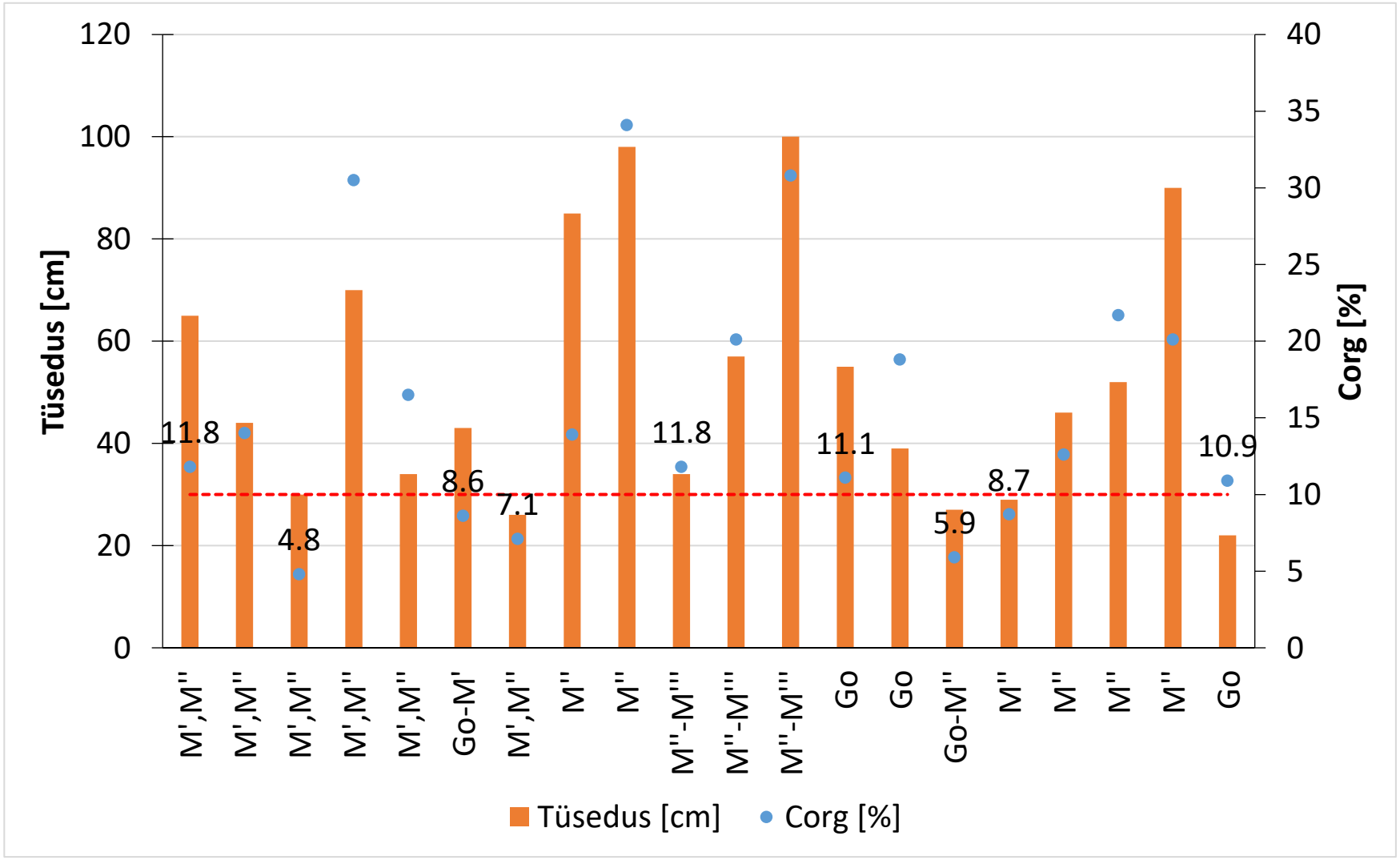
Kraavide tuvastamine

Välitööd + laborianalüüsid

Kogume andmeid (välitööd+laborianalüüsid), et mudeliga tuvastada, kui suur osa turvasmuldi oleme tänaseks kaotanud

Mullastiku kaardi uuendamine

- 2024. aasta kokkuvõte
  - 23% kogutud mullaproovidest (koguarv 667) ei kohaldu enam turvasmulla kriteeriumi hulka.
  - 156 proovi C_{org} väärtus oli alla ”lubatud” piiri (12%)
- 2025 toimusid intensiivsed välitööd:
  - 1229 turvasmulla sondeerimist
  - 1669 turvastunud mulla sondeerimist



Muld hoiab endas 1500 miljardit tonni süsinikku

Aga kuidas süsinikku kauem mullas hoida?

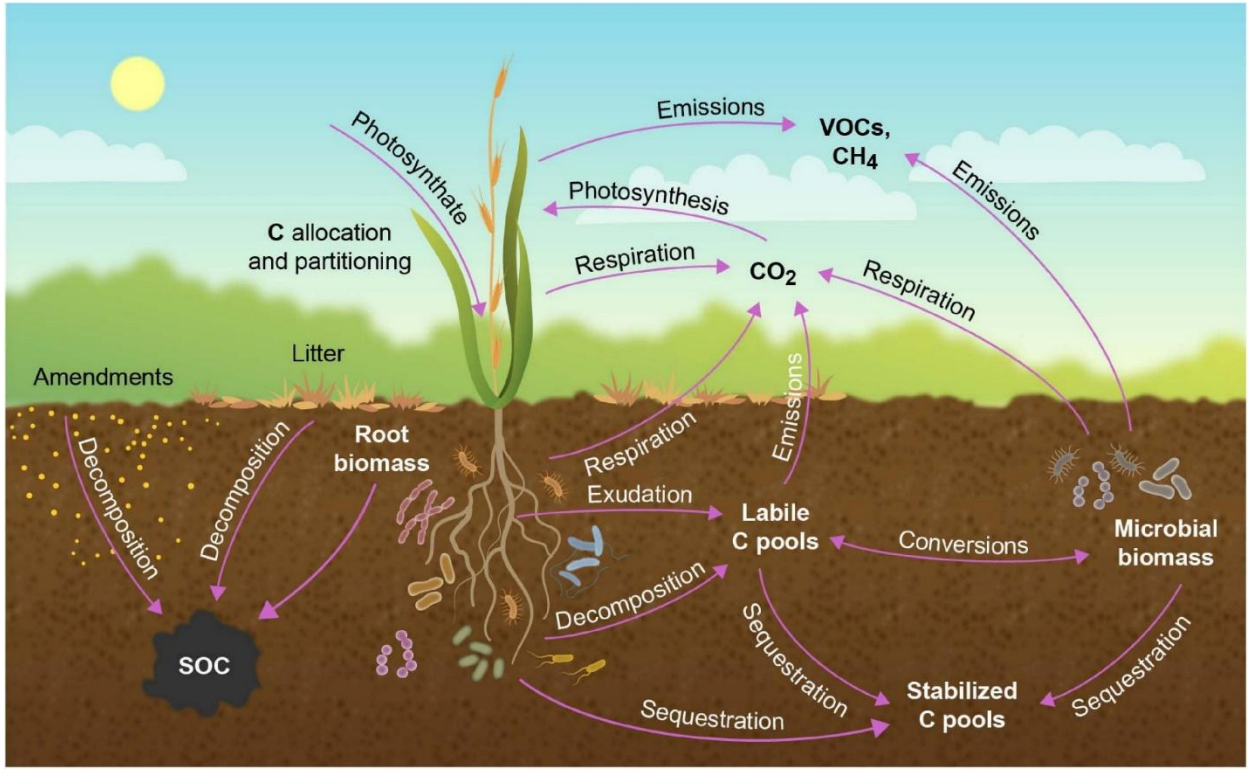
Garcia-Franco, et al. 2020

Selline süsinikuringlus on oluline komponent kliimamuutuste kontekstis

Sisend – Väljund = Süsiniku (C) talletamine

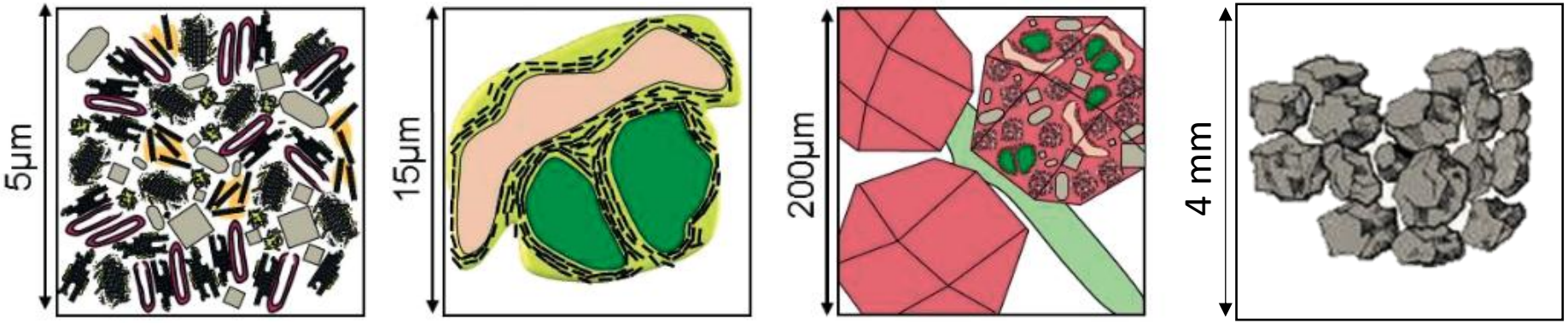
C sisend < C väljund = C kadu

C sisend > C väljund = **C talletamine**



Jansson et al., 2021 (Front. Plant Sci.)

Millest muld koosneb?

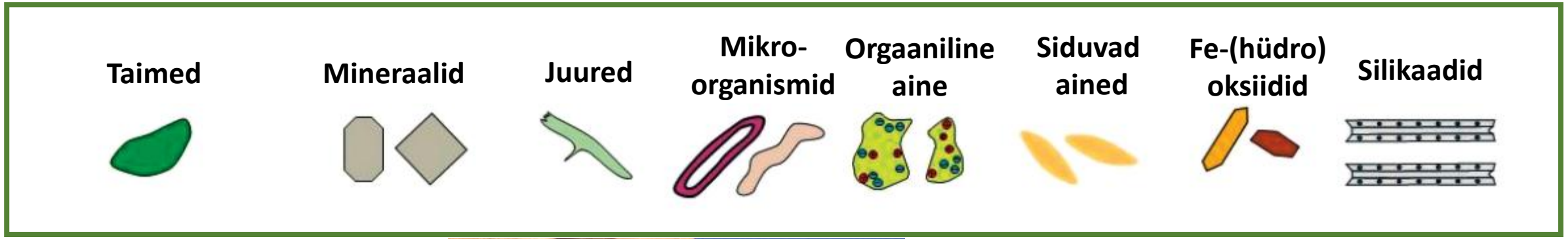


Agregaadid

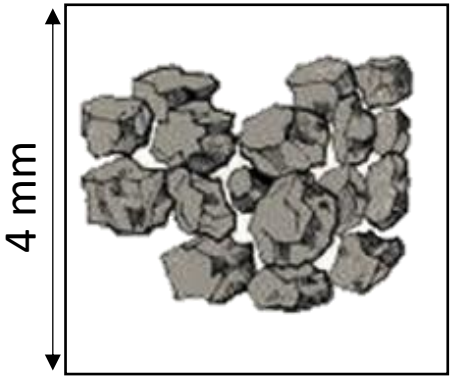
Orgaaniline aine ja mineraalid moodustavad mullas agregaate

Totsche et al., 2018

Millest muld koosneb?



https://soilhealth.ucdavis.edu/soil-challenges/structural-degradation



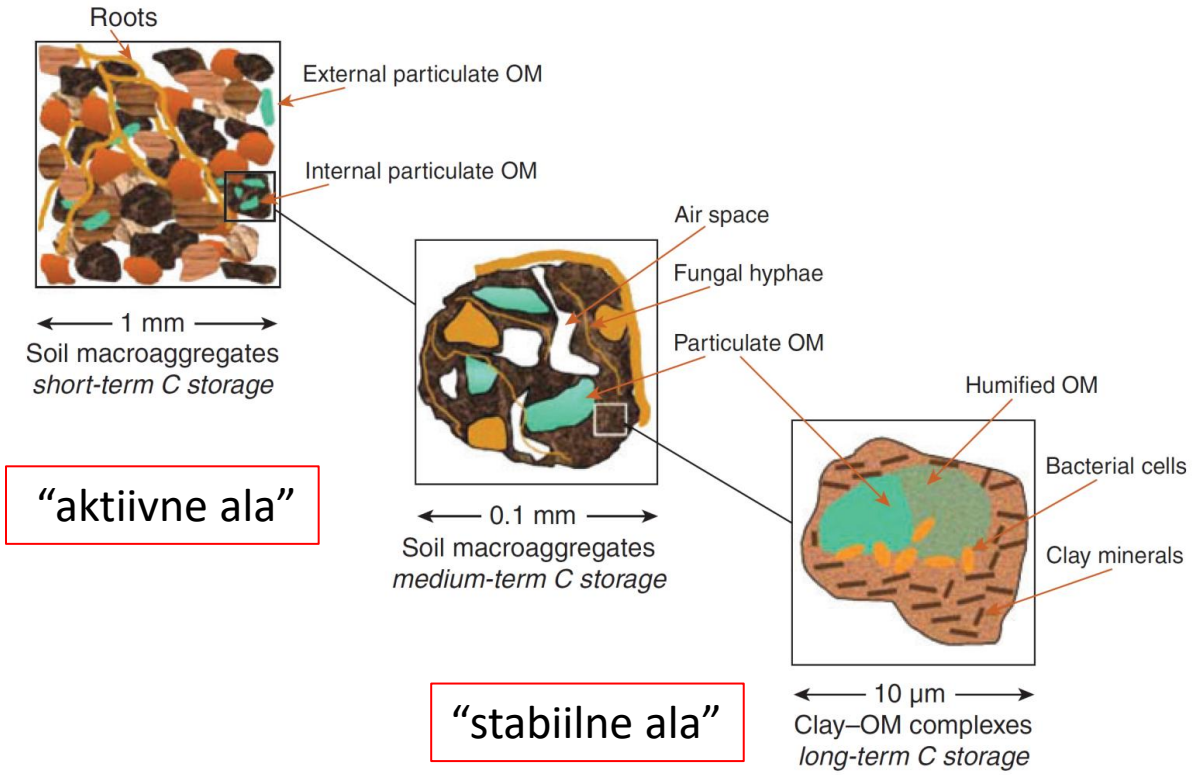
Agregaadid

Mulla agregaadid on lihtsas keeles nagu „mullatükid“

Totsche et al., 2018

Võimalus nr 1. C_{org}-talletamine agregaatides

Mida väiksemas agregaadis on süsinik, seda kauem ta mullas püsib

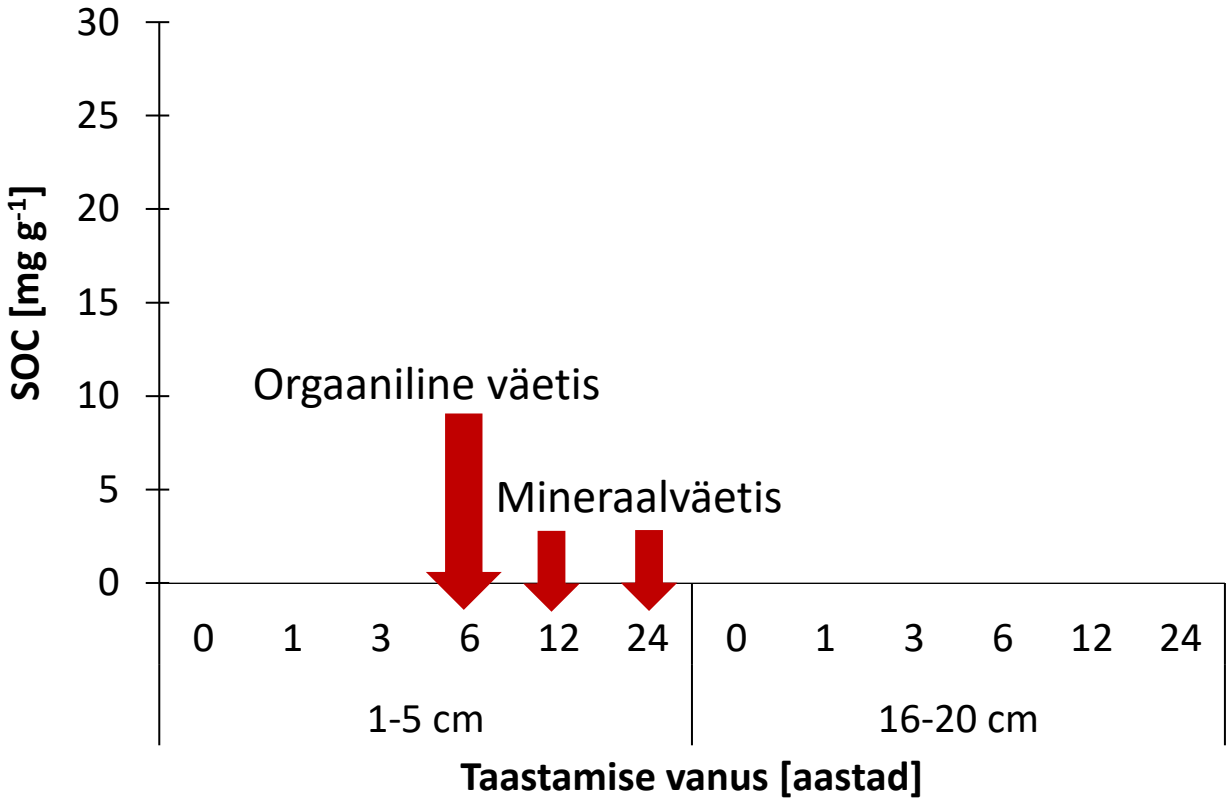


“aktiivne ala”

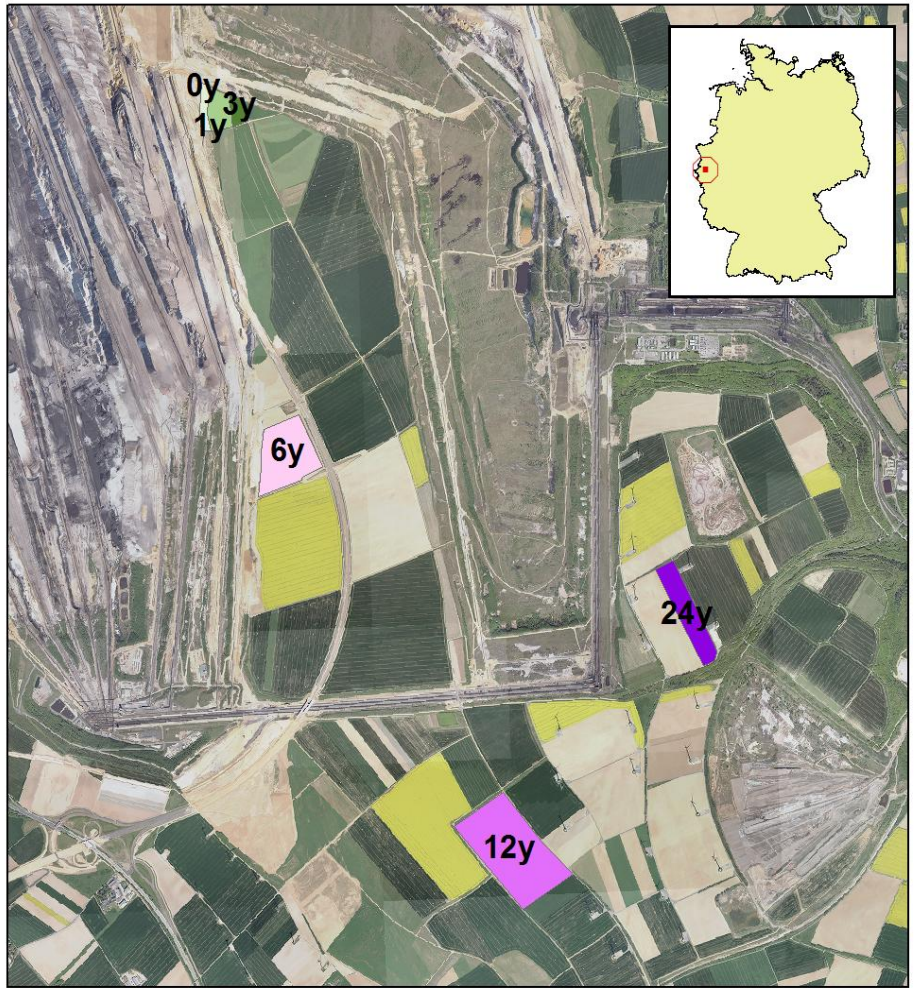
“stabiilne ala”

Edwards and Bremner, 1967; Tisdall and Oades, 1982; Eyles et al. 2015

Näide, kuidas C_{org} agregaadis on mõjutatud inimtegevusest

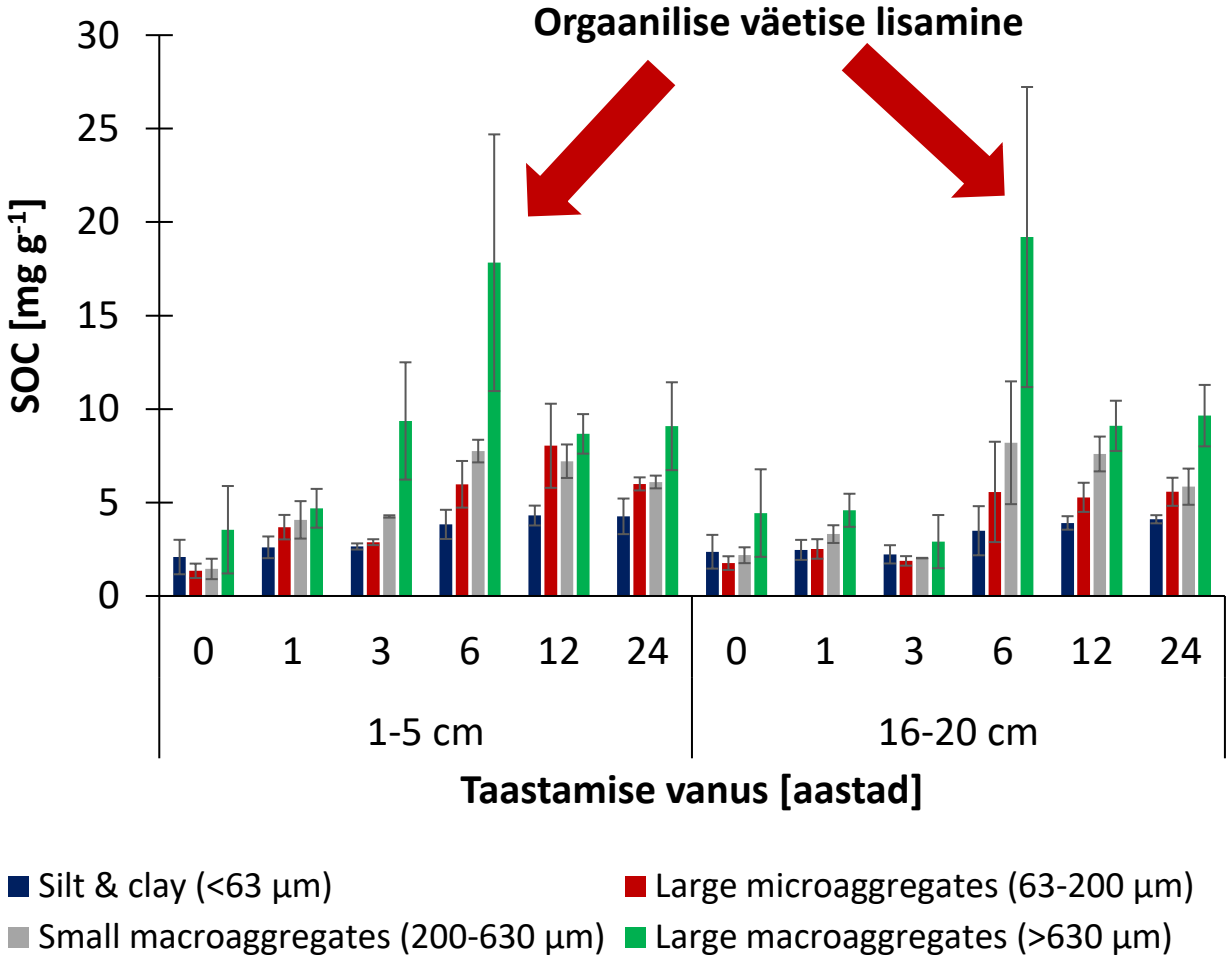


Silt & clay (<63 µm)
Large microaggregates (63-200 µm)
Small macroaggregates (200-630 µm)
Large macroaggregates (>630 µm)



Pihlap et al., 2021

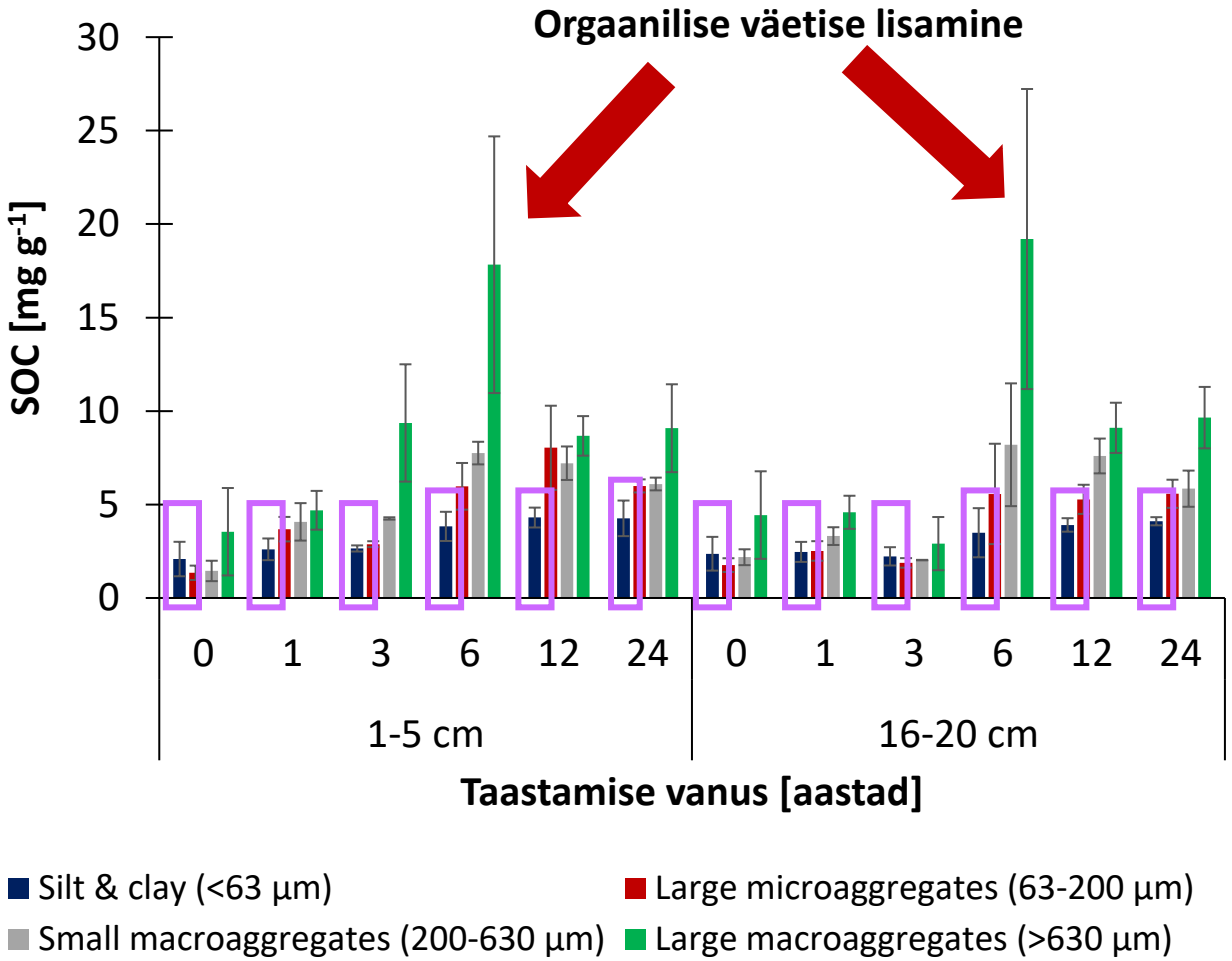
Näide, kuidas C_{org} agregaadis on mõjutatud inimtegevusest



Orgaanilise väetamise lisamisel jõudis süsinik suurtesse agregaatidesse

Pihlap et al., 2021

Näide, kuidas C_{org} agregaadis on mõjutatud inimtegevusest



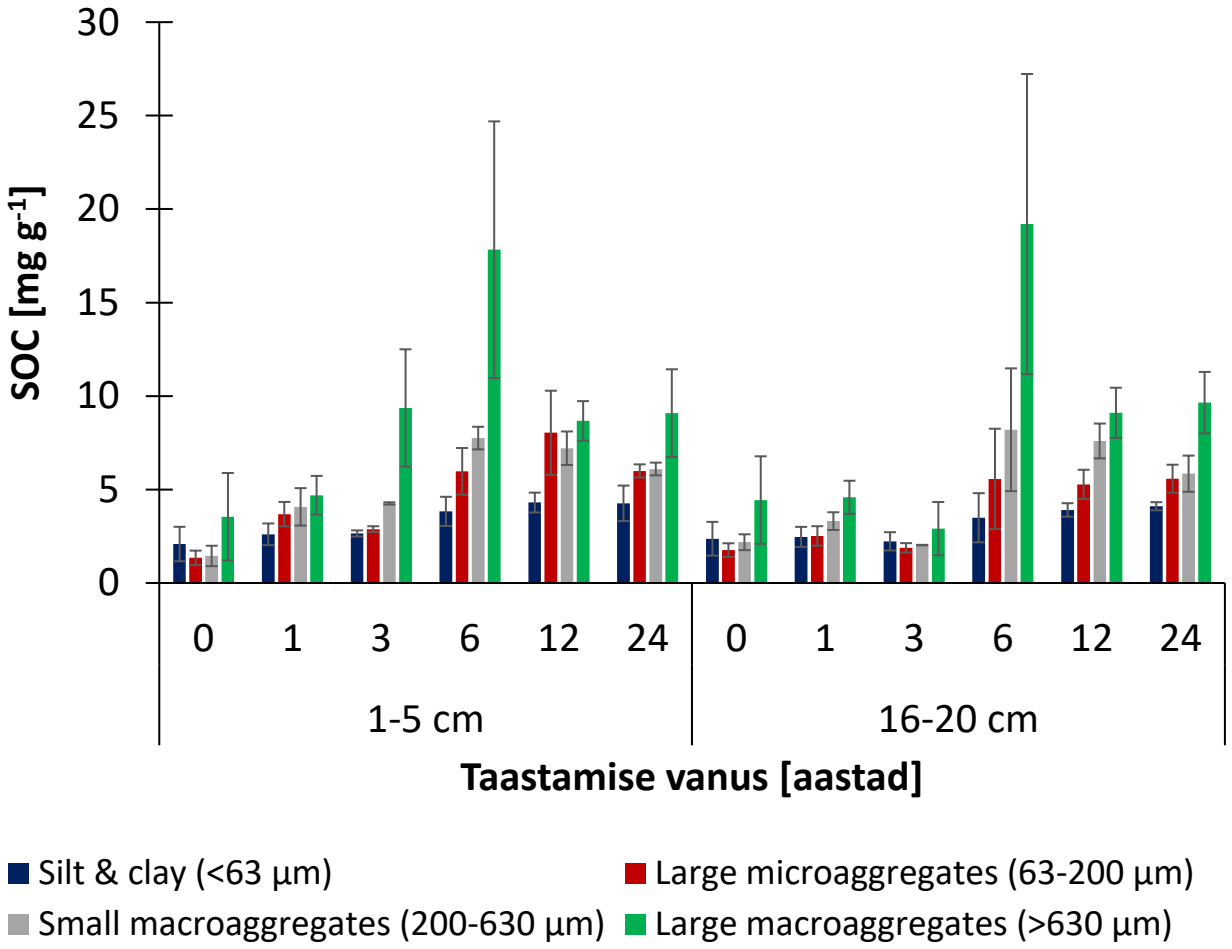
Orgaaniline aine jõudis suurtesse agregaatidesse

aga...

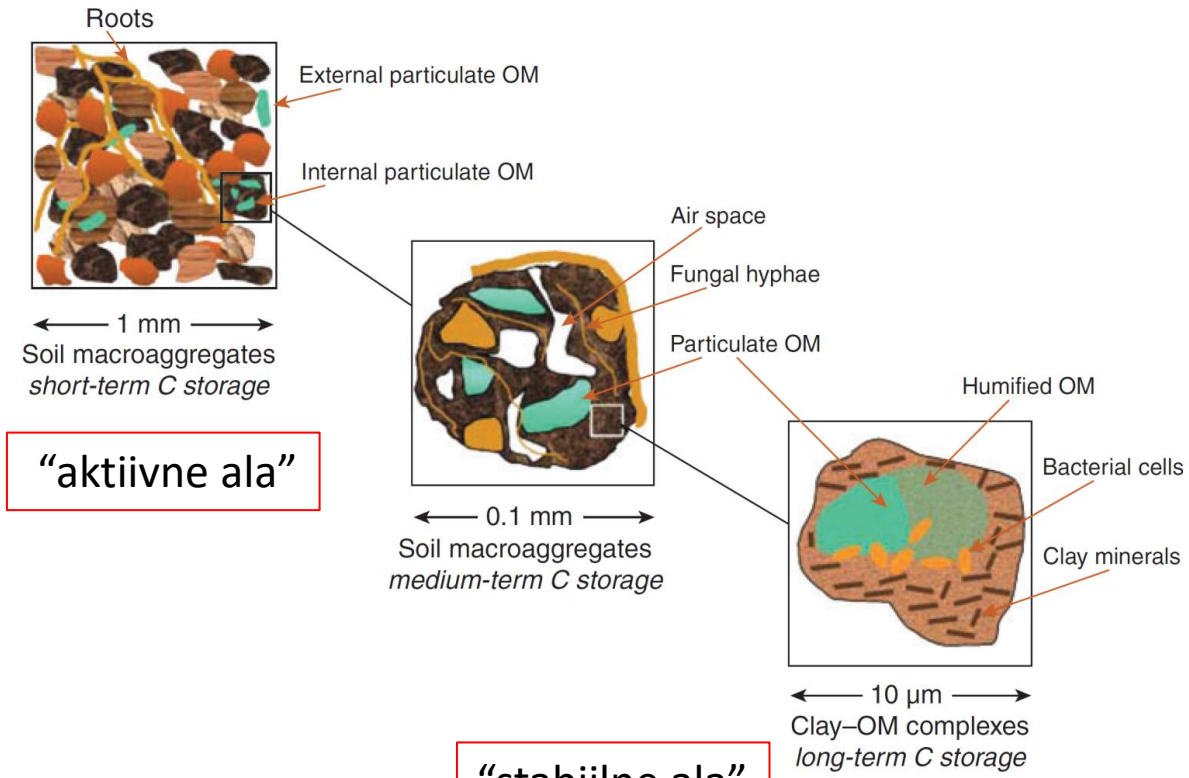
väikestes agregaatides ei toimunud midagi

Pihlap et al., 2021

Näide, kuidas C_{org} agregaadis on mõjutatud inimtegevusest



Mida väiksemas agregaadis on süsinik, seda kauem ta mullas püsib

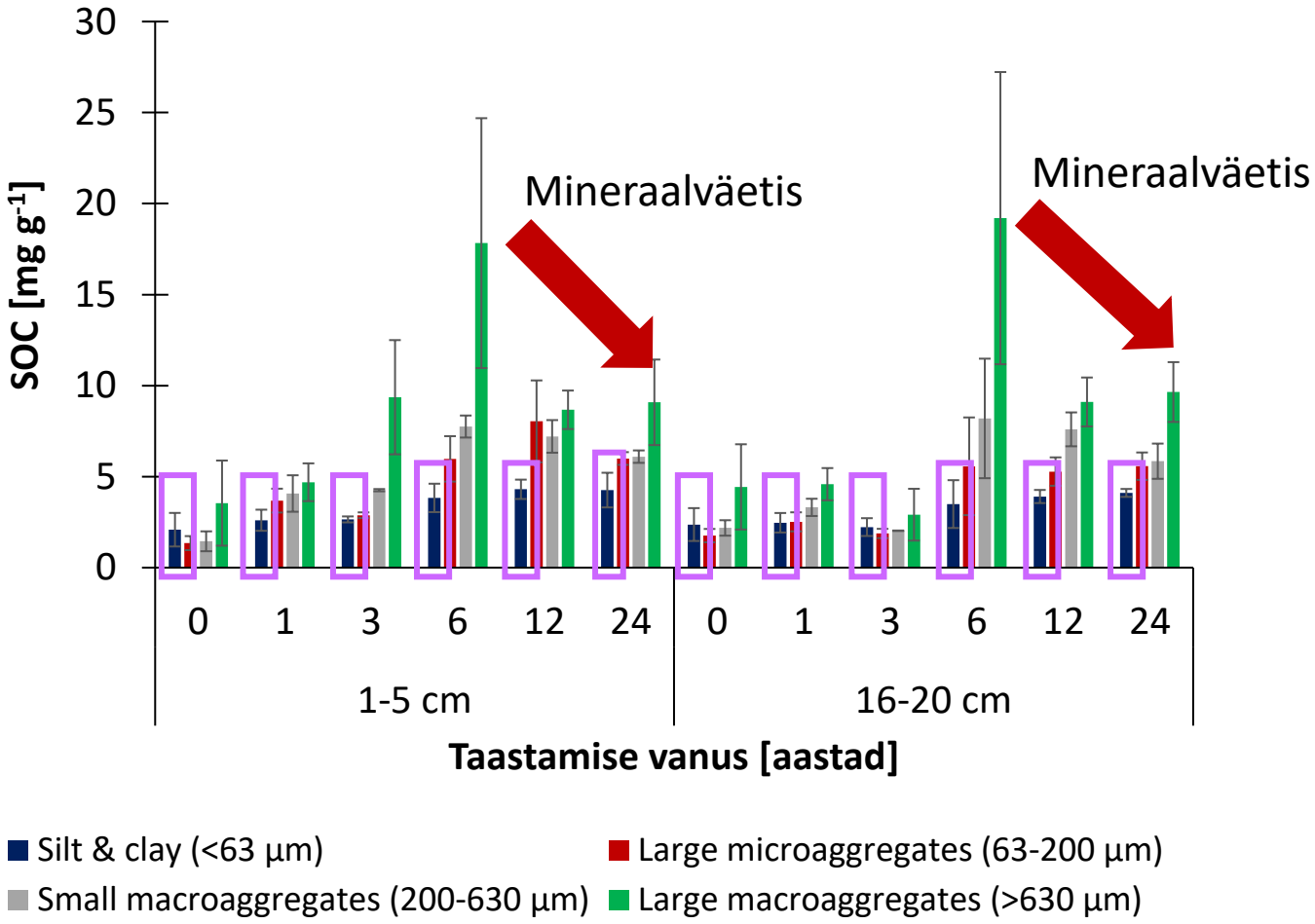


"aktiivne ala"

"stabiilne ala"

Edwards and Bremner, 1967; Tisdall and Oades, 1982; Eyles et al. 2015

Näide, kuidas C_{org} agregaadis on mõjutatud inimtegevusest



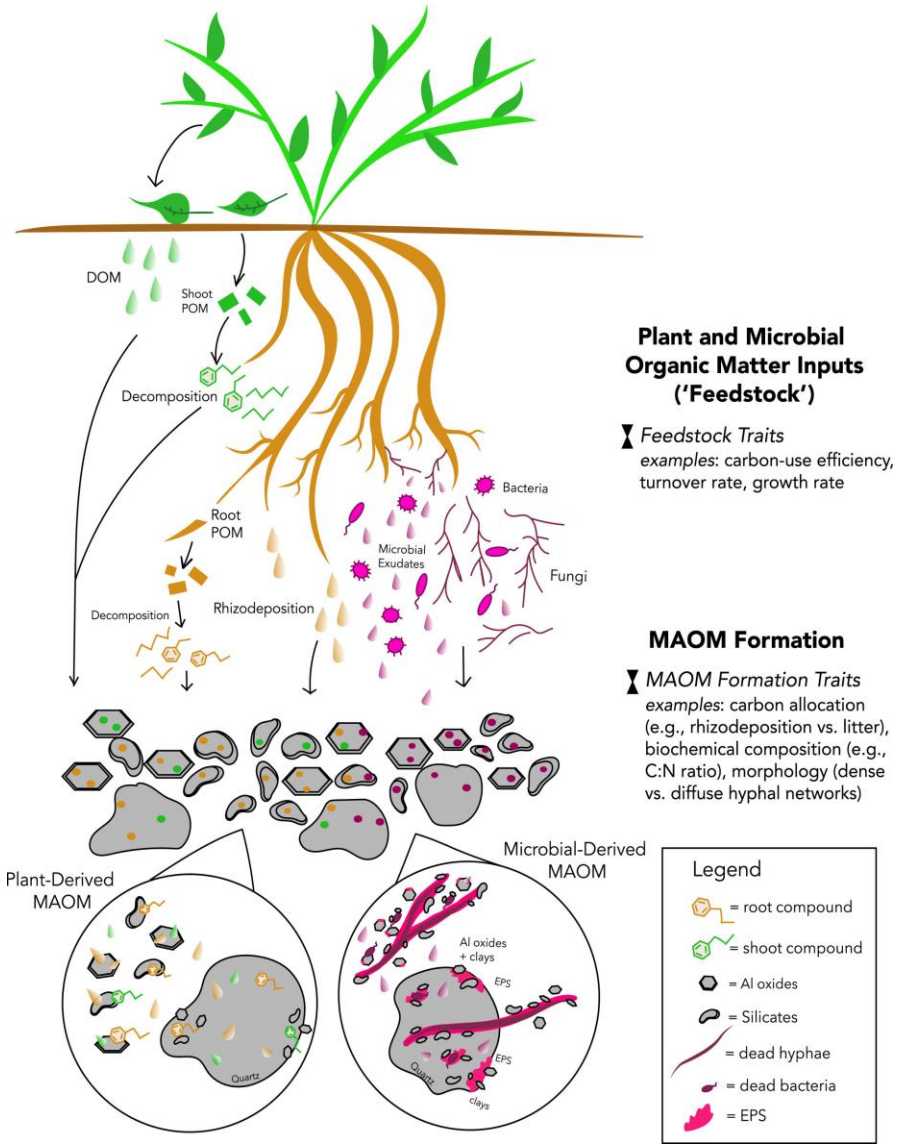
Orgaaniline aine jõudis suurtesse agregaatidesse

aga...

väikestes agregaatides ei toimunud midagi

👎 Hakkame mullas süsinikku kaotama, kui sisend muutub ja majandame põllumaid intensiivselt

Pihlap et al., 2021



Sokol et al., 2022

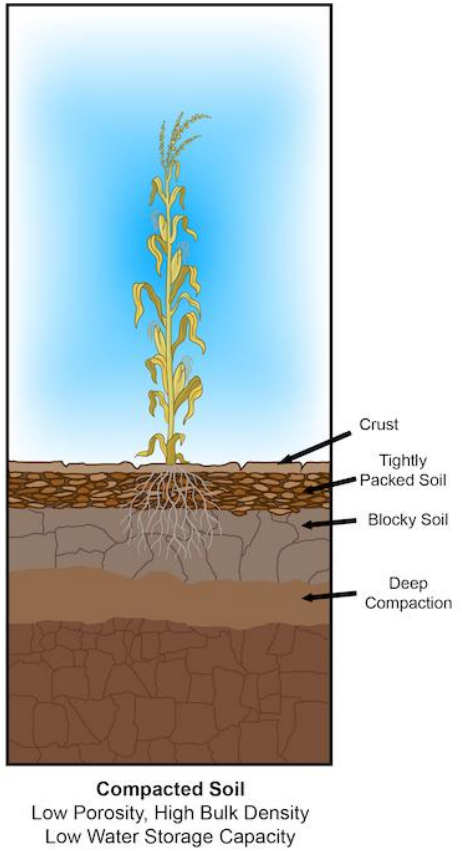
Tänapäeva mullateadus töötab selle nimel, et leida võimalusi C_{org} pikemaks talletamiseks ning leida tasakaal stabiilse ja labiilse orgaanilise aine vahel

Väike vahepeatus:

Mis suur töö on orgaanilisel süsinikul veel vaja teha?

Ta hoiab ka mullastruktuuri koos

Video taken by Richard Smith, Environment Agency



Compacted Soil
Low Porosity, High Bulk Density
Low Water Storage Capacity

Kui mullal on struktuur nõrk, siis juhtuvad sellised asjad

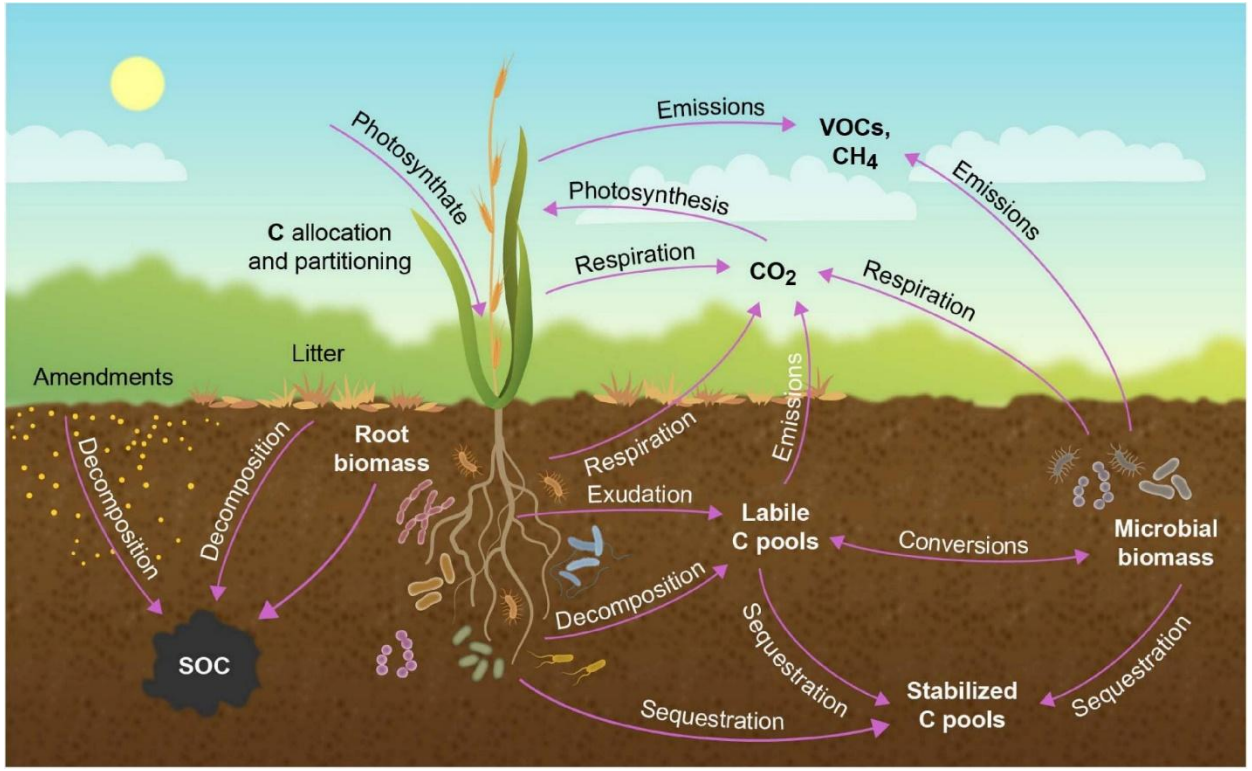
Mullastruktuur mõjutab: mikroobide mitmekesisust, juurte liikuvust, C mineraliseerumist, toitainete kättesaadavust jne.

Selline süsinikuringlus on oluline komponent kliimamuutuste kontekstis

Sisend – Väljund = Süsiniku (C) talletamine

C sisend < C väljund = C kadu

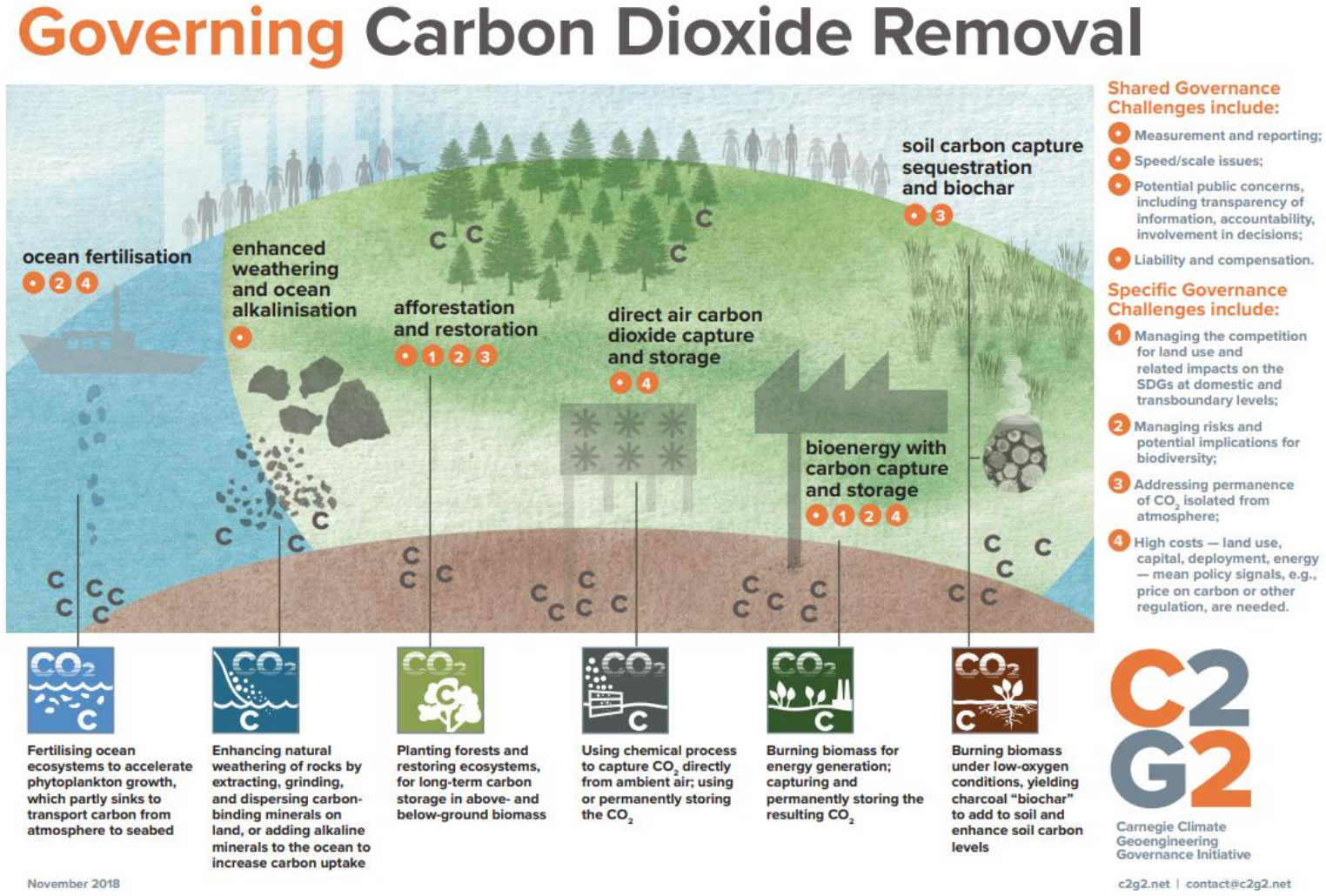
C sisend > C väljund = C talletamine



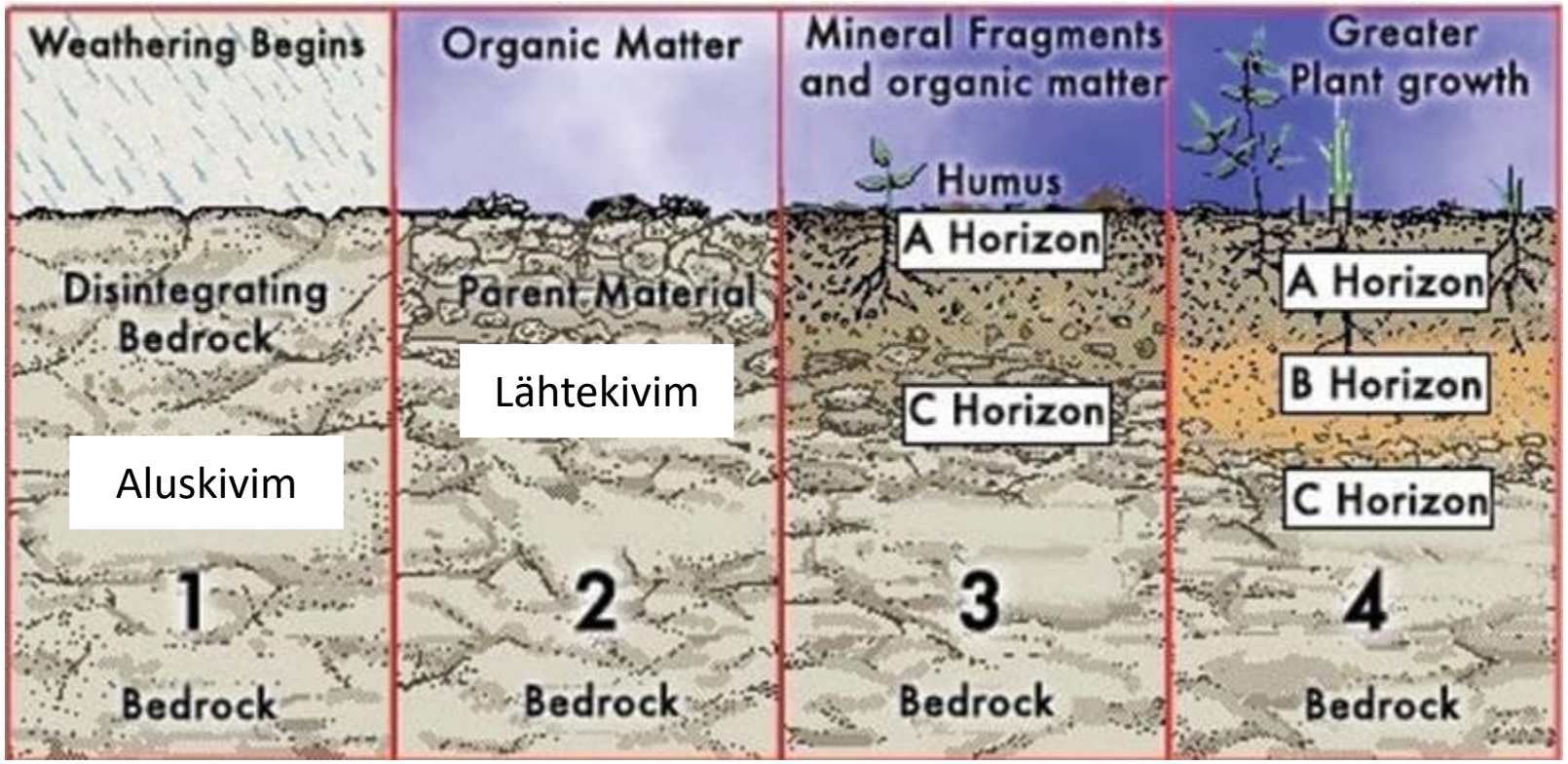
Jansson et al., 2021 (Front. Plant Sci.)

Atmosfäärist süsinikdioksiidi (CO_2) eemaldamise tehnoloogiate ehk CDR rakendamine

- Süsinikdioksiidi eemaldamise (CDR) tehnoloogiad põllumajanduses:
  - Eesmärk aeglustada globaalset soojenemist sidudes atmosfääri CO_2-te
  - Looduslikud lahendused:
    - ***Enhcanced mineral weathering*** tehnoloogia- mineraalide keemilise murenemine süsihappega reaktsioonis
    - Metsad ja rohumaad on looduses suured süsiniku neelajad- seovad atmosfäärist süsihappegaasi fotosünteesi käigus ning tallevad seda biomassi ja mulda.



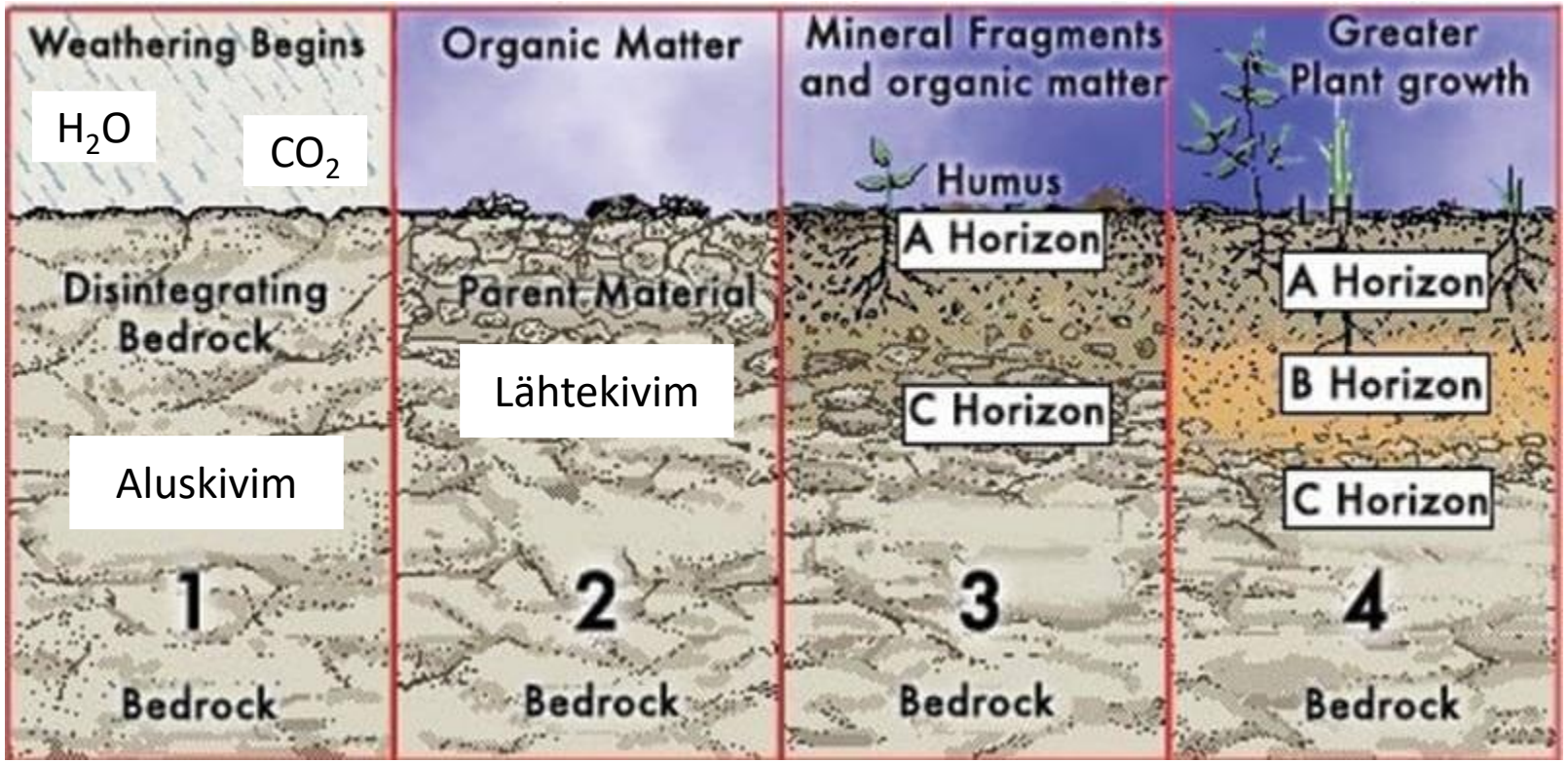
Kuidas tekib muld?



Allikas: GoGreen (Quora).

Kuidas tekib muld?

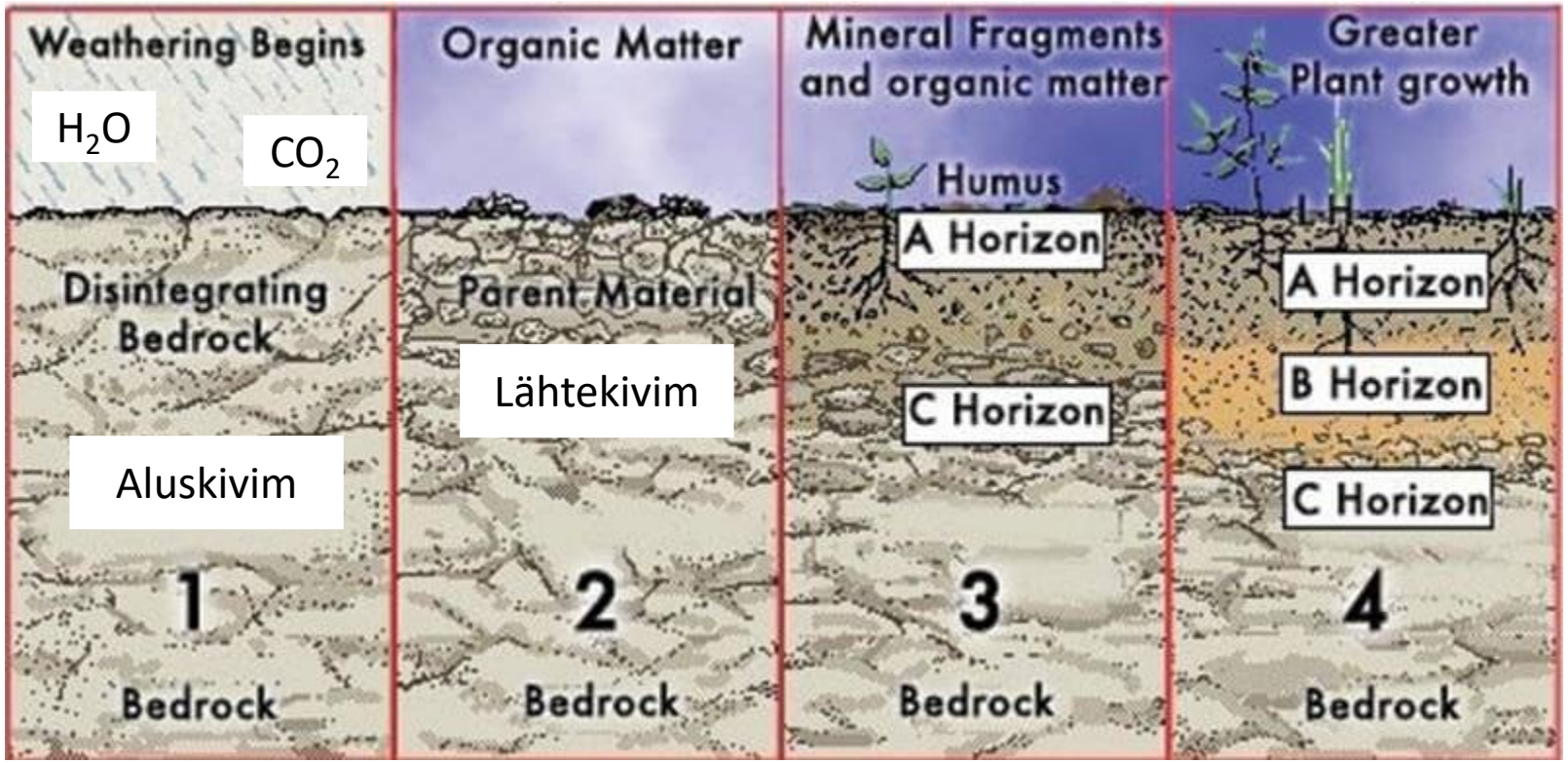
Süsihappe teke: $CO_2+H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$



Allikas: GoGreen (Quora).

Kuidas tekib muld?

Süsihappe teke: $CO_2+H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$ Kui võtame kivimi juurde, mis siis saab?

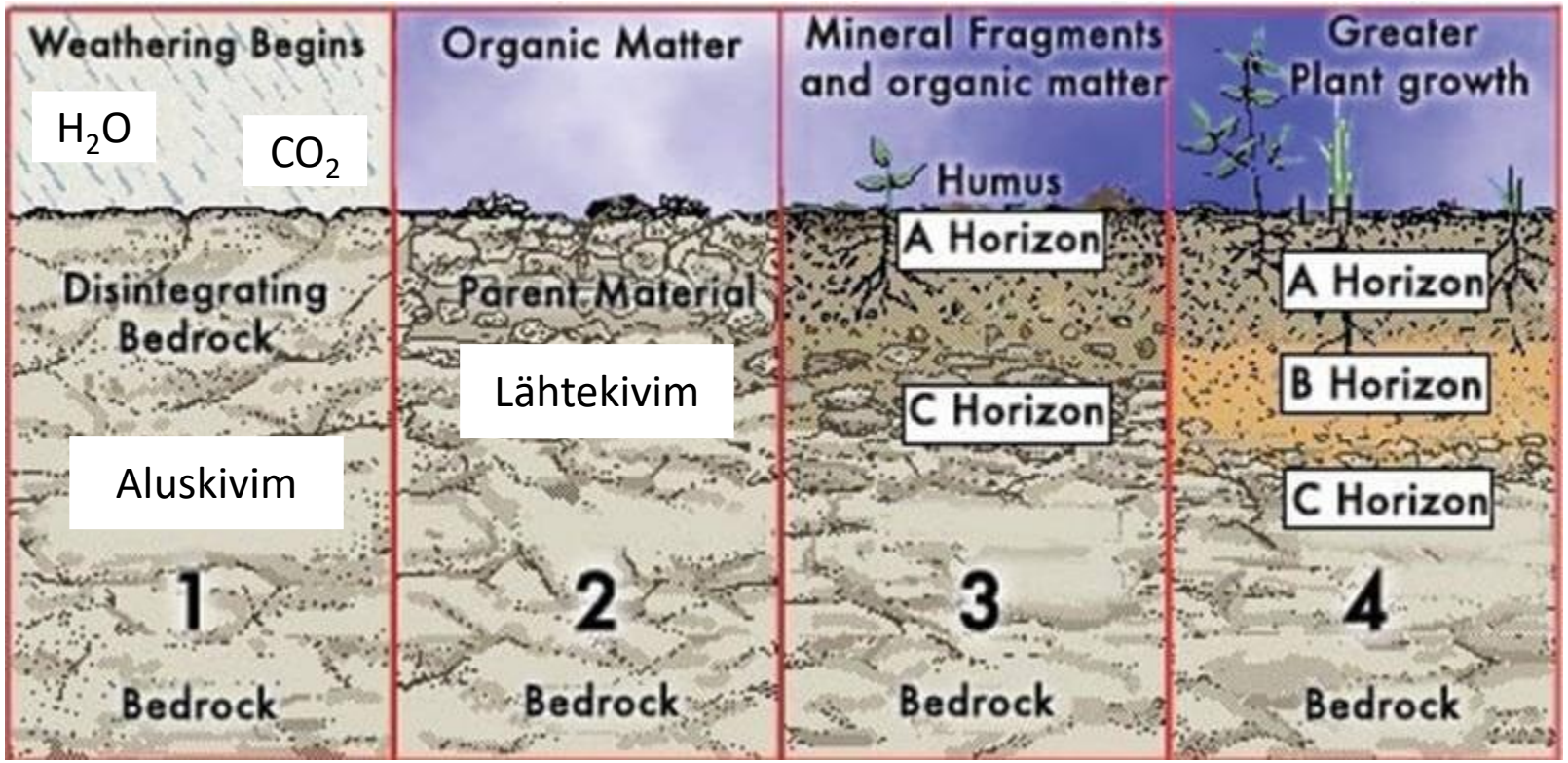


Allikas: GoGreen (Quora).

Kuidas tekib muld?

bikarbonaat

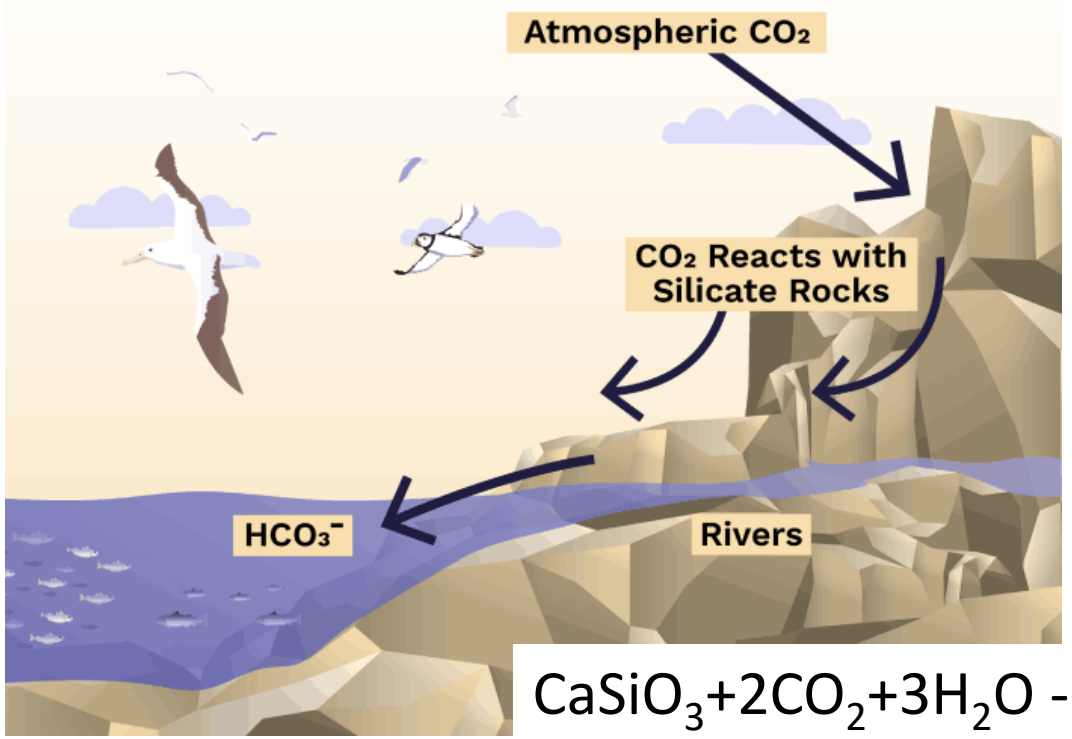
$$CaSiO_3+2CO_2+3H_2O \rightarrow H_4SiO_4+\mathbf{2HCO_3^-}+Ca^{2+}$$

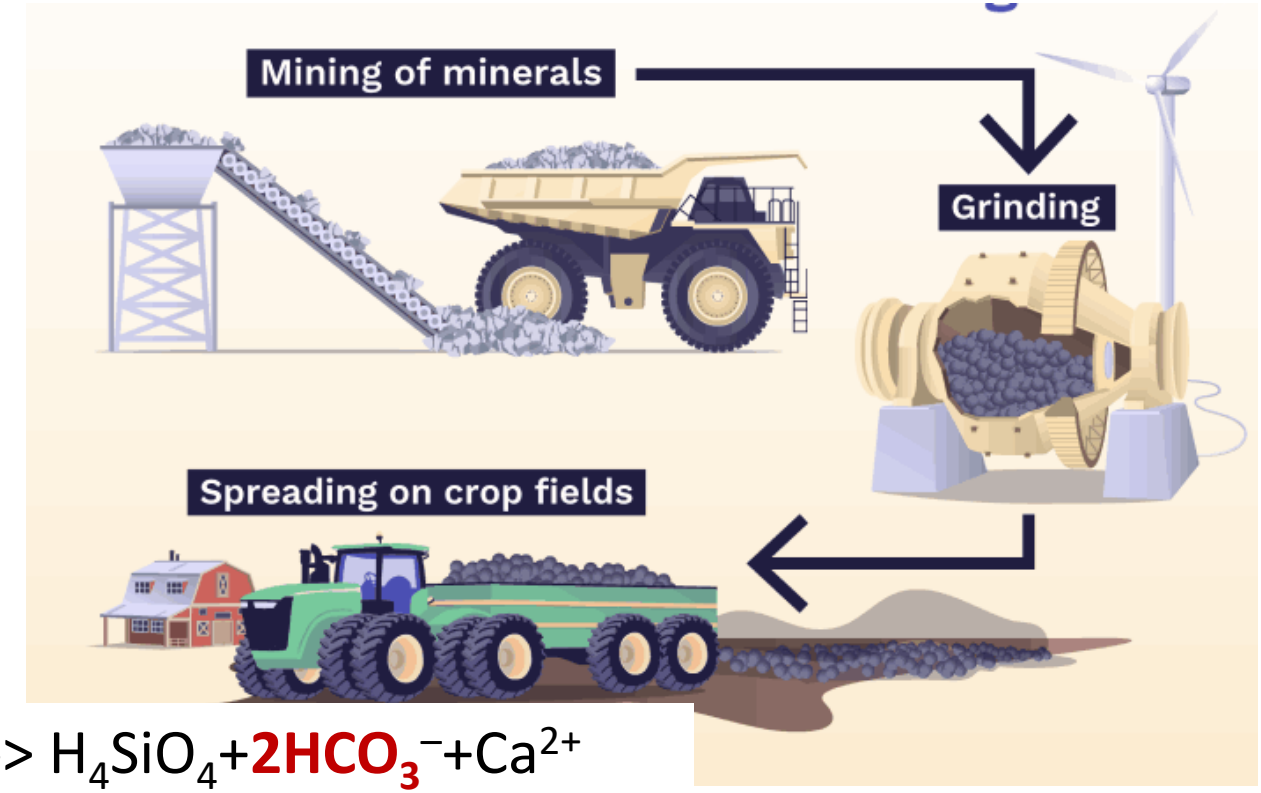


Allikas: GoGreen (Quora).

Võimalus nr 2: keemiline C-sidumine

Keemiline kivimi murenemine viiakse olemasolevasse mulda



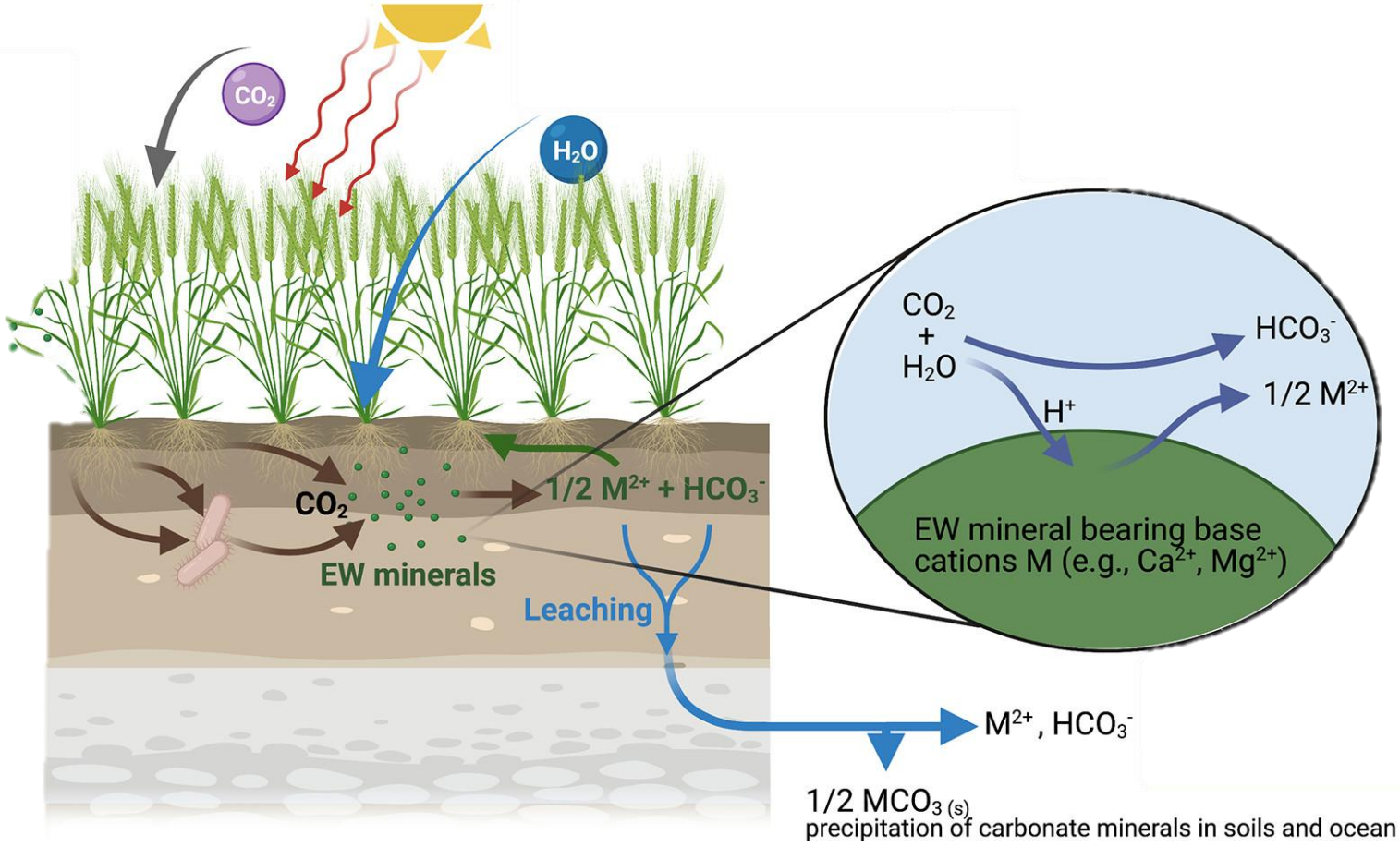


$$CaSiO_3+2CO_2+3H_2O \rightarrow H_4SiO_4+\mathbf{2HCO_3^-}+Ca^{2+}$$

https://climatescience.org/advanced-enhanced-weathering

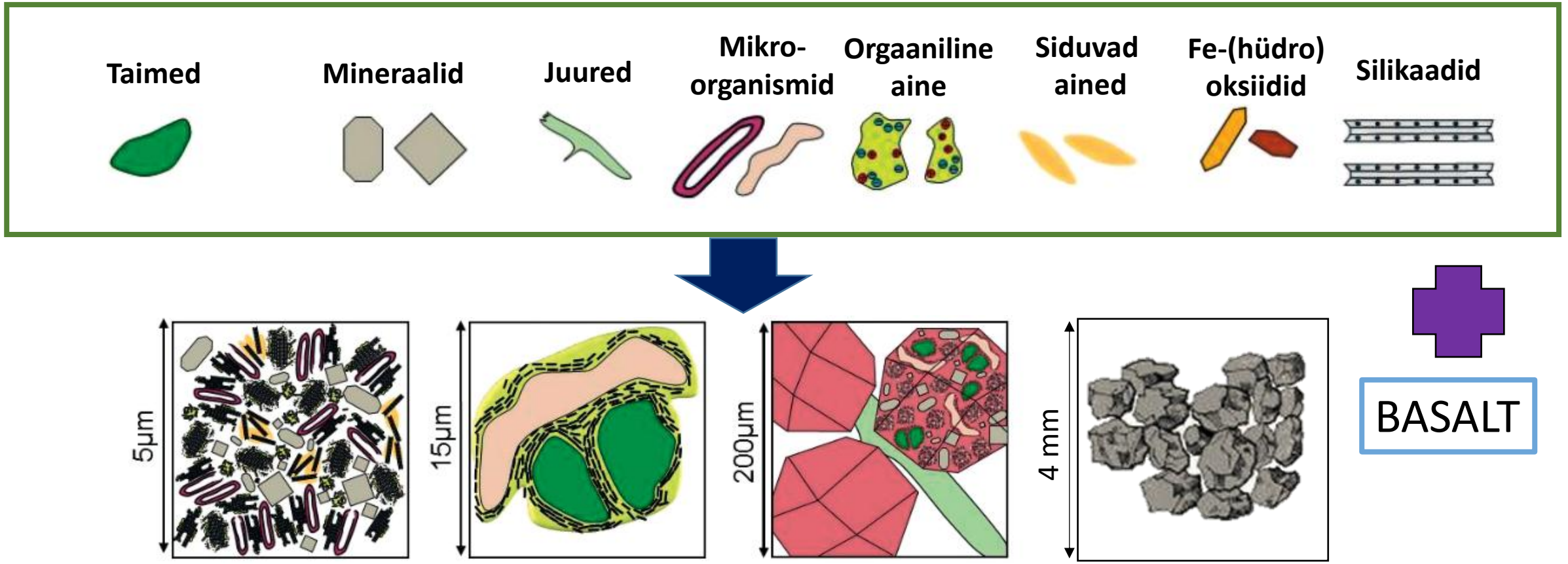
Võimalus nr 2: keemiline C-sidumine

Mineraali lisamine põllumaale



Calabrese et al., 2022

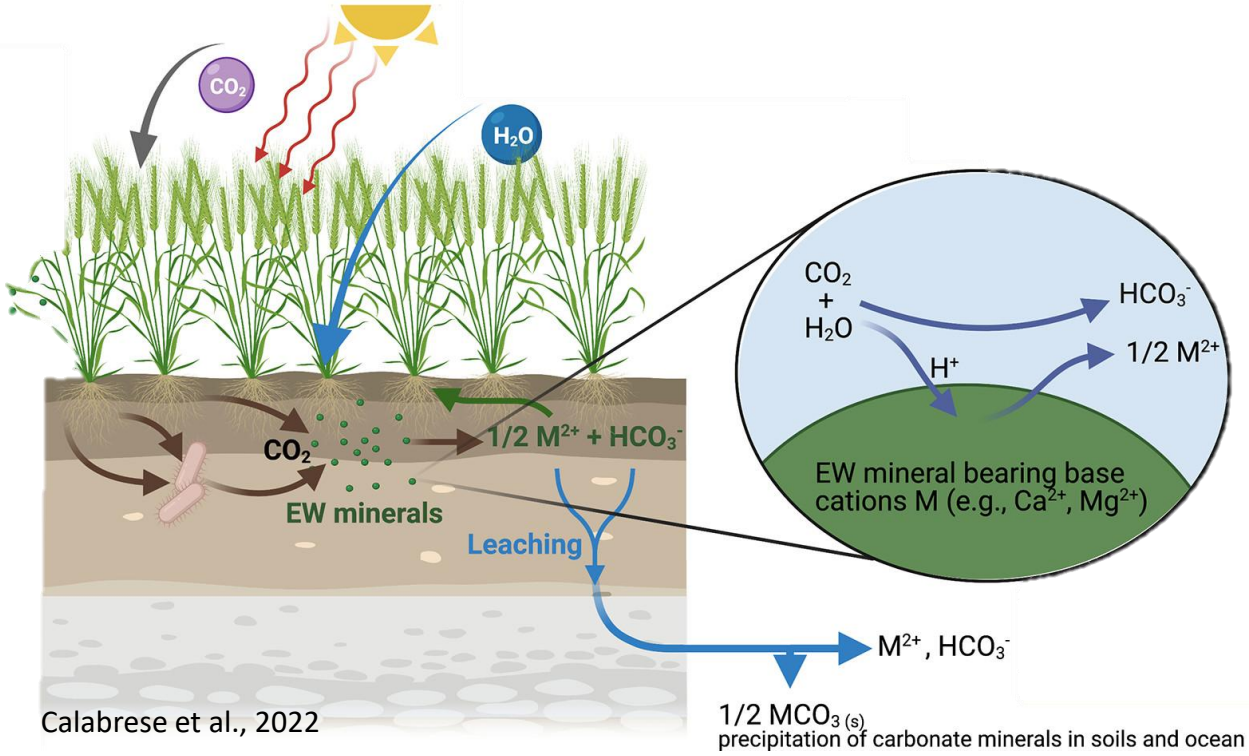
Anorgaanilise süsiniku sidumine $CaSiO_3+2CO_2+3H_2O \rightarrow H_4SiO_4+\mathbf{2HCO_3^-}+Ca^{2+}$



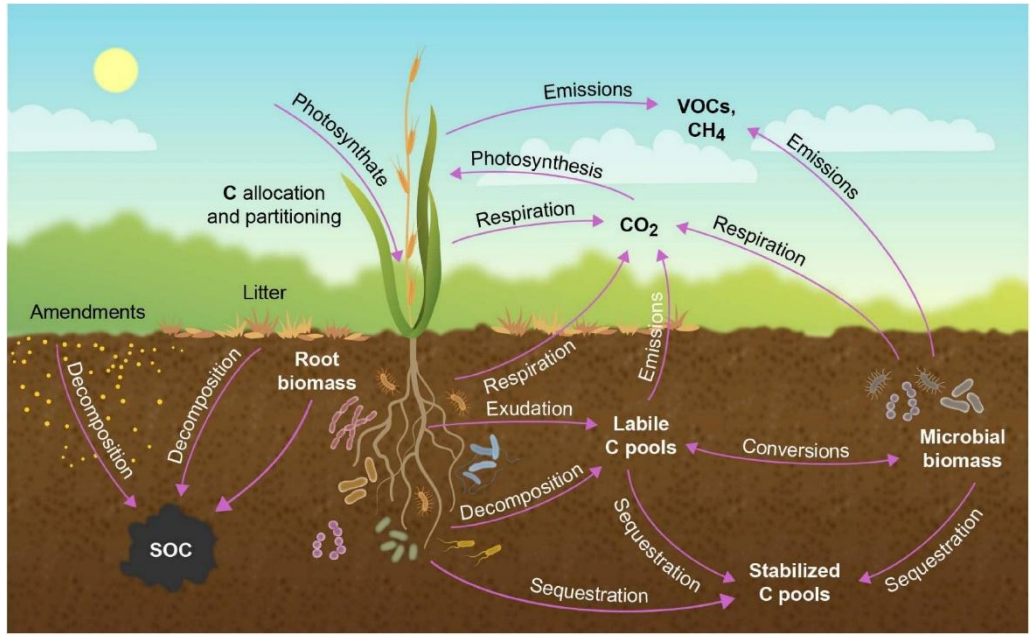
Mis juhtub mullaga, kui me mineraale lisame?
Kas lisaks CO_2 sidumisele suurendame ka orgaanilise C-sisaldust?

Totsche et al., 2018

Miks selline küsimus üldse tekib?



Calabrese et al., 2022

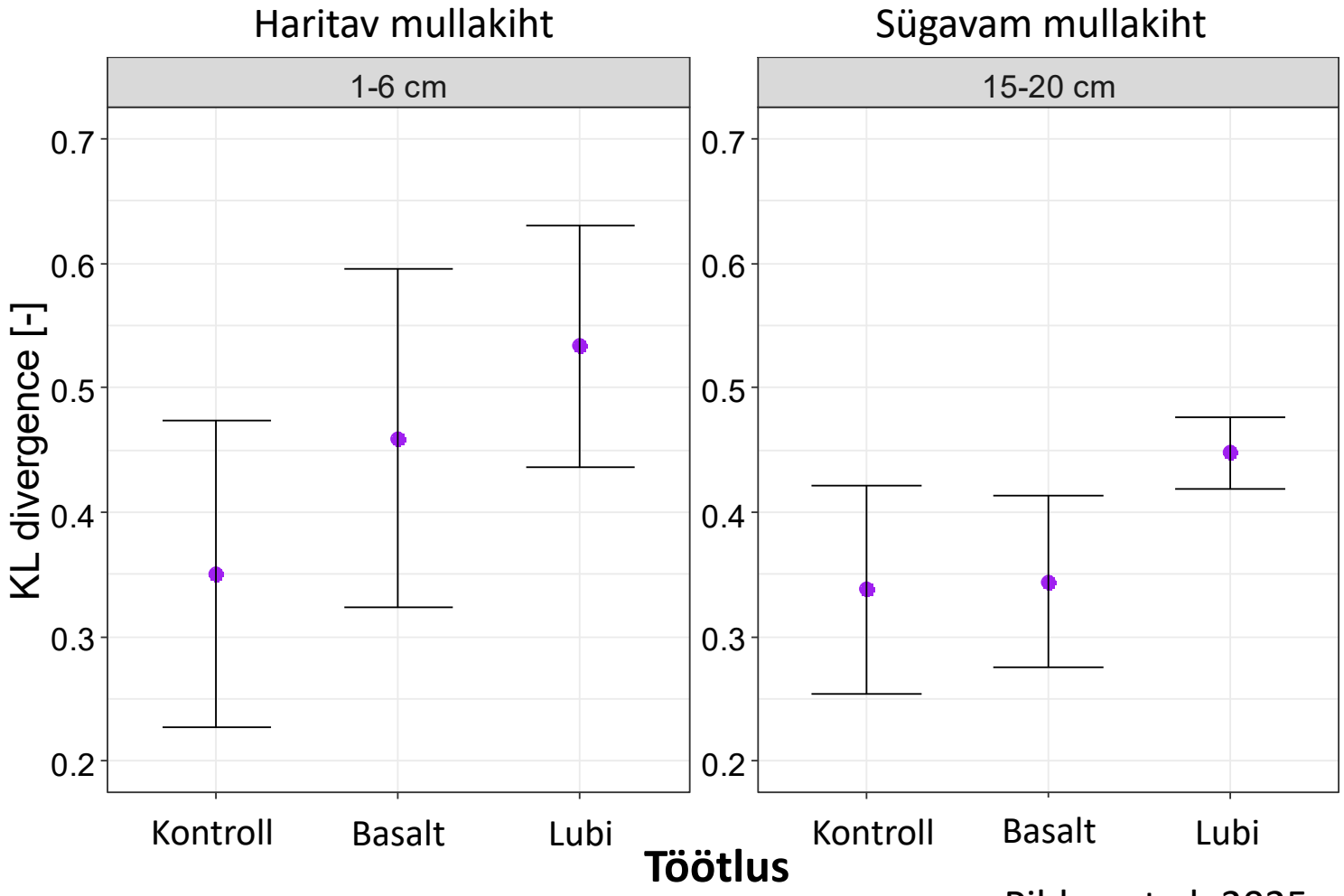


$CaSiO_3 + 2CO_2 + 3H_2O \rightarrow H_4SiO_4 + \mathbf{2HCO_3^-} + Ca^{2+}$

Sest sellel ajal, kui mineraalid lagunevad, siis taimed ja muld on ikka aktiivsed

Mullastruktuuri kvaliteet

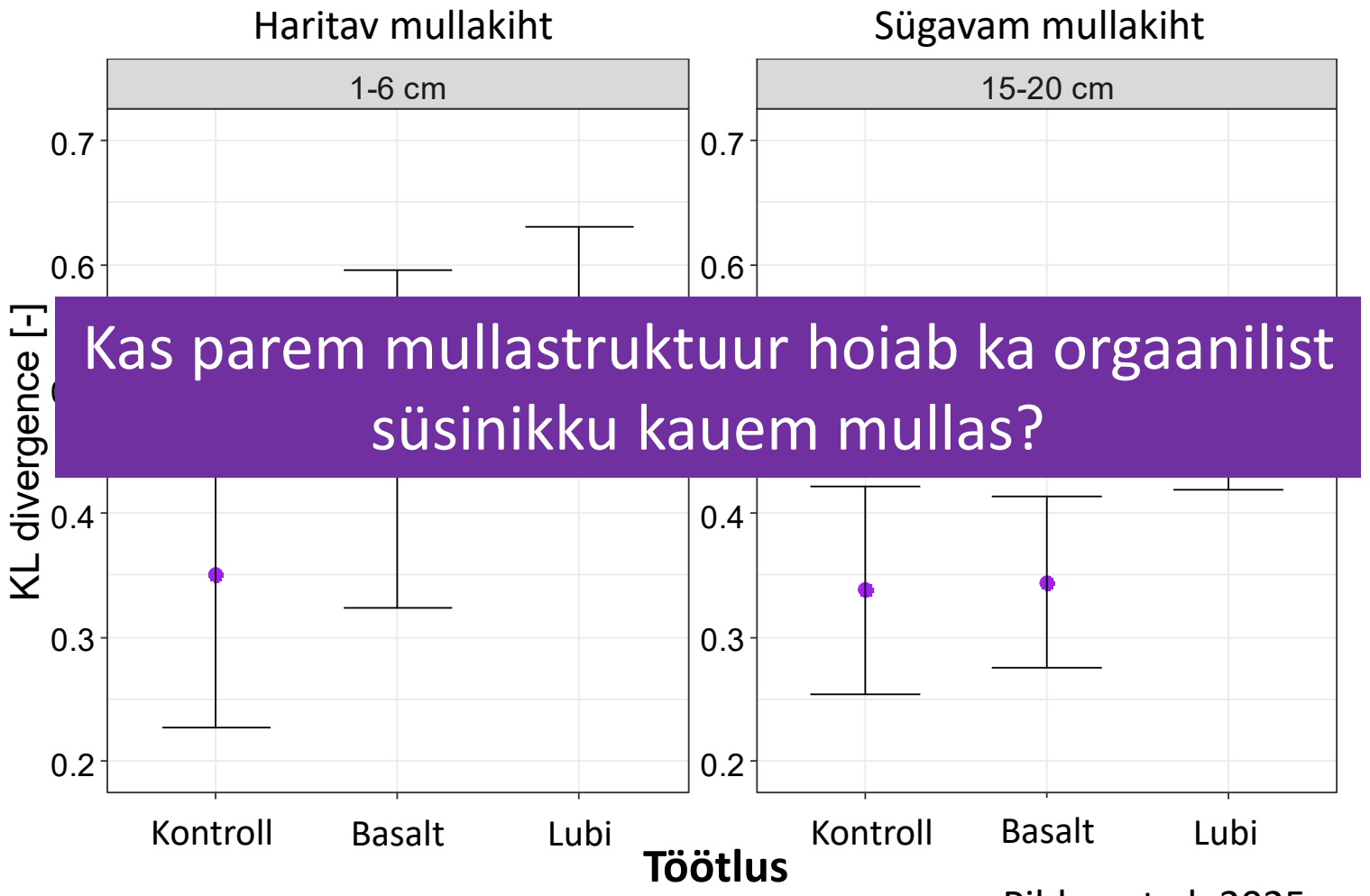
- Lupjamine parandab mullastruktuuri rohkem kui basalt



Pihlap et al.,2025

Mullastruktuuri kvaliteet

- Lupjamine parandab mullastruktuuri rohkem kui basalt

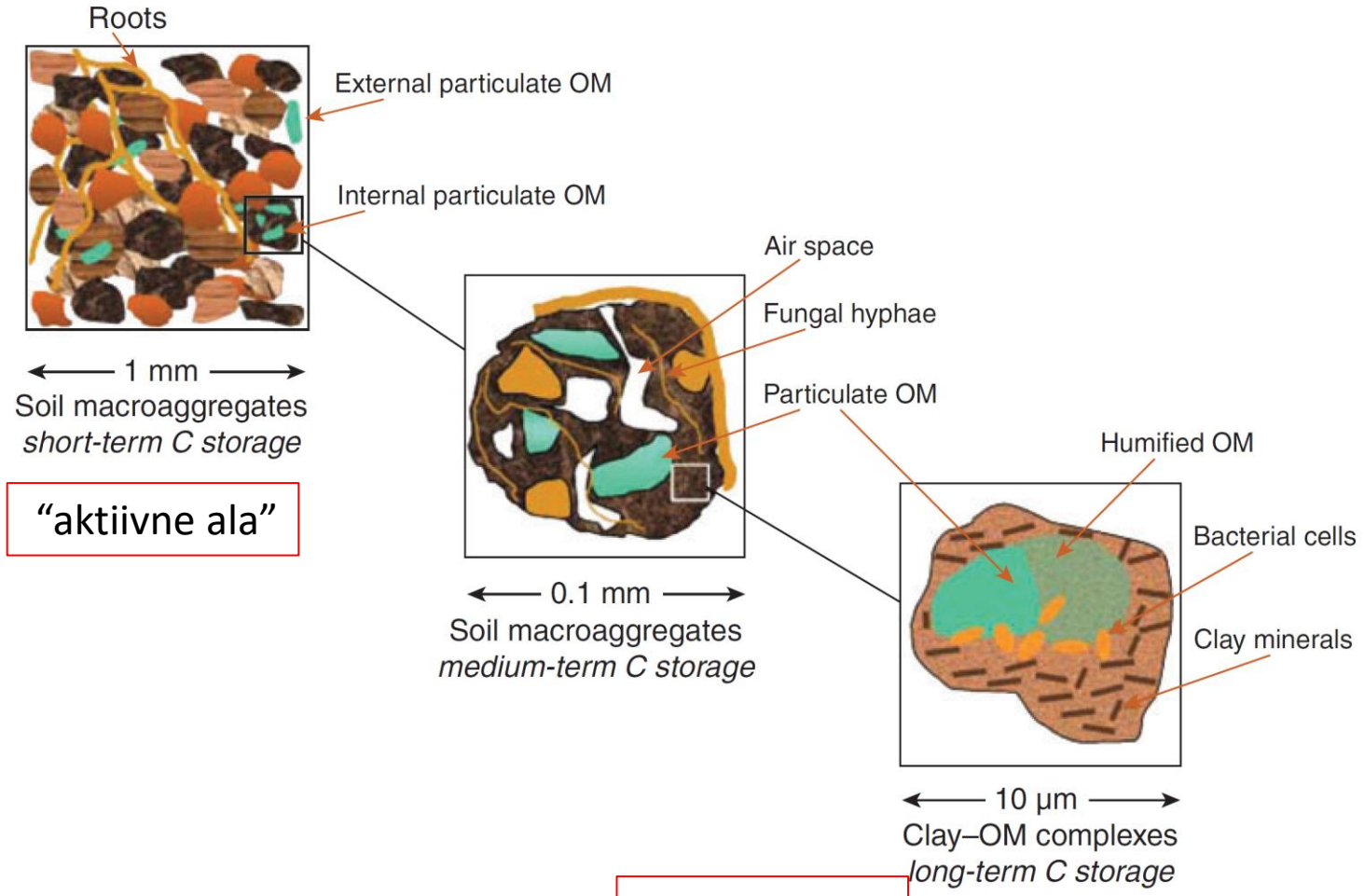


Kas parem mullastruktuur hoiab ka orgaanilist süsinikku kauem mullas?

Pihlap et al.,2025

Kuidas hinnata orgaanilise C talletamist?

- Tuleme tagasi agregaatide juurde ☺
- Põhimõte: hinnata stabiilse ala orgaanilise süsiniku akumuleerumist



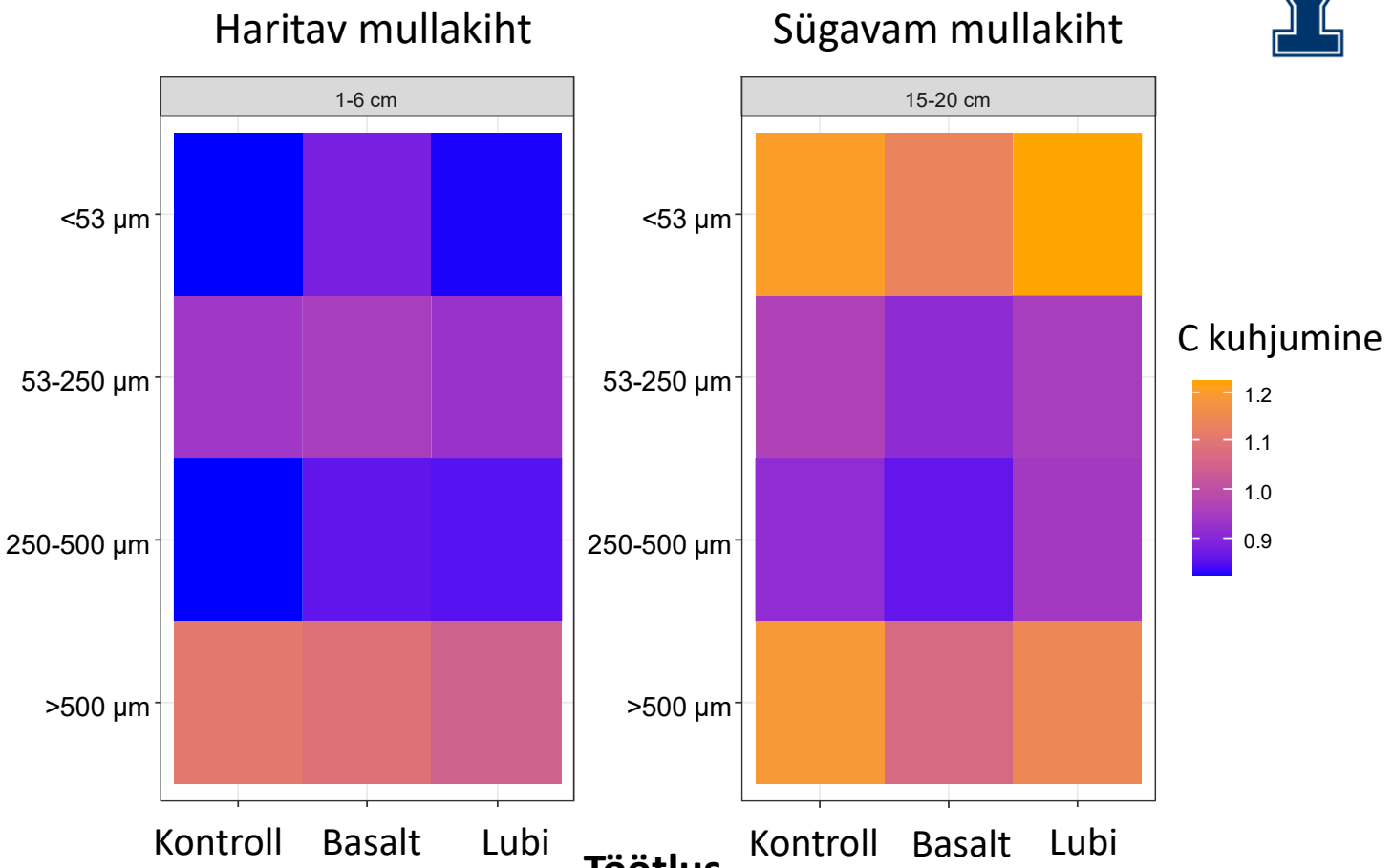
"aktiivne ala"

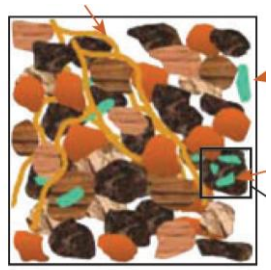
"stabiilne ala"

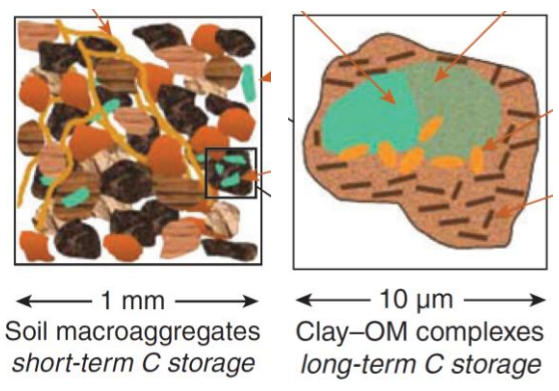
Edwards and Bremner, 1967; Tisdall and Oades, 1982; Eyles et al. 2015

Pihlap et al.,2025

- Haritavas mullakihis orgaaniline C on talletatud suurematesse agregaatidesse
- Sügavamal on toimub orgaanilise C talletamine ka väiksemates osakestes -> orgaanilist C hoitakse kauem mullas
- Mineraali lisamine andis väikest efekti



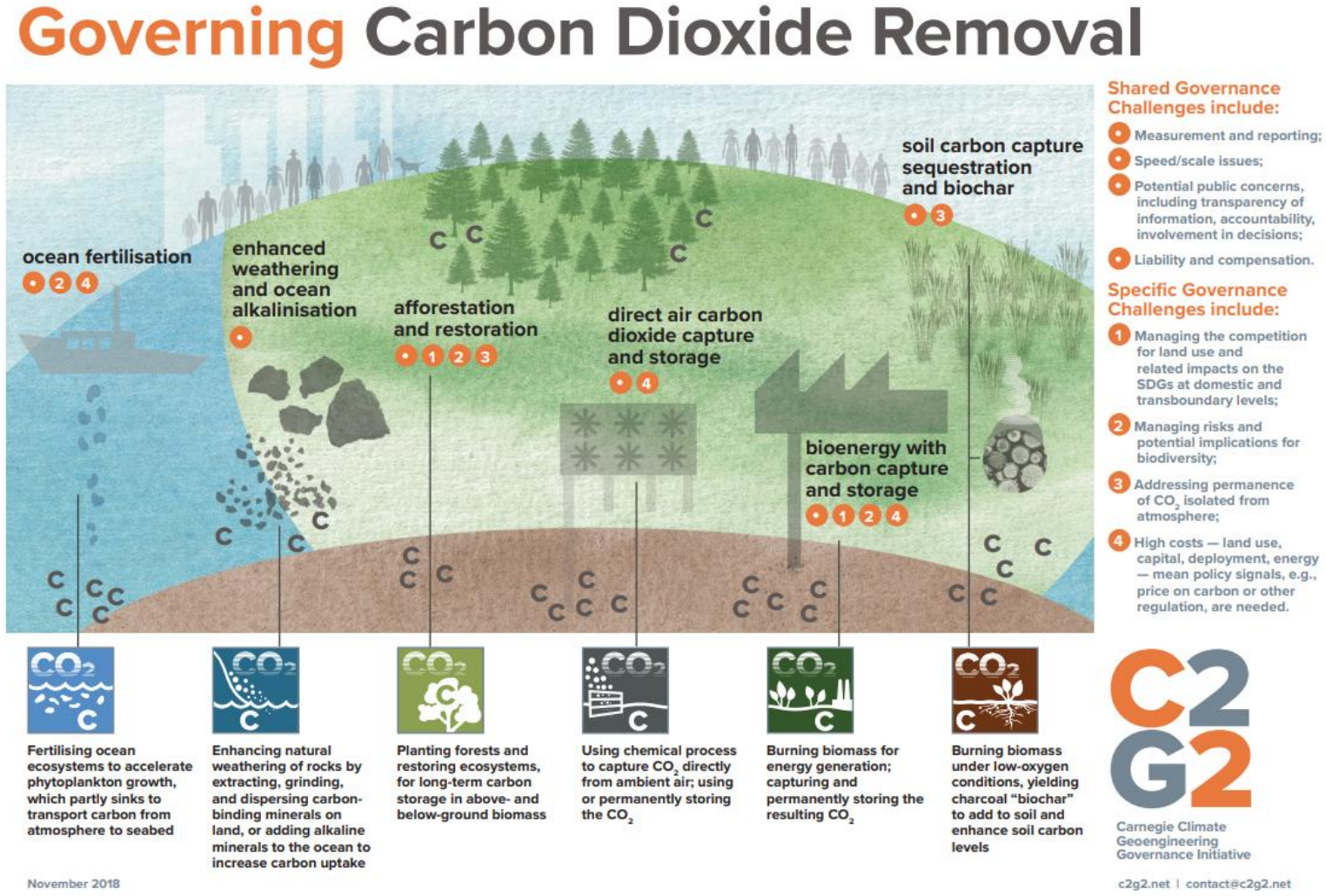




Pihlap et al.,2025

Atmosfäärist süsinikdioksiidi (CO_2) eemaldamise tehnoloogiate ehk CDR rakendamine

- Süsinikdioksiidi eemaldamise (CDR) tehnoloogiad põllumajanduses:
  - Eesmärk aeglustada globaalset soojenemist sidudes atmosfääri CO_2-te
  - Looduslikud lahendused:
    - *Enhcanced mineral weathering* tehnoloogia- mineraalide keemilise murenemine süsihappega reaktsioonis
    - **Metsad ja rohumaad** on looduses suured süsiniku neelajad- seovad atmosfäärist süsihappegaasi fotosünteesi käigus ning tallevad seda biomassi ja mulda.



Põllumaa | Rohumaa | Uusmetsastamine | Taasmetsastamine | Põlismetsad

Kikas, K., Ostonen, I., Pihlap, E.

- Süsiniku talletamise suur potentsiaal on seadnud fookuse uusmetsastamisele, taasmetsastamisele ja rohumaade taastamisele kui looduslikule CDR tehnoloogiale.

- Loodusliku CDR tehnoloogia rakendamine suuremat survet põllumajandusmaadele ja looduslikele ökosüsteemidele, mis hakkavad kannatama maakasutuse muutuse tõttu.

Põllumaa → Rohumaa → Uusmetsastamine → Taasmetsastamine → Põlismetsad

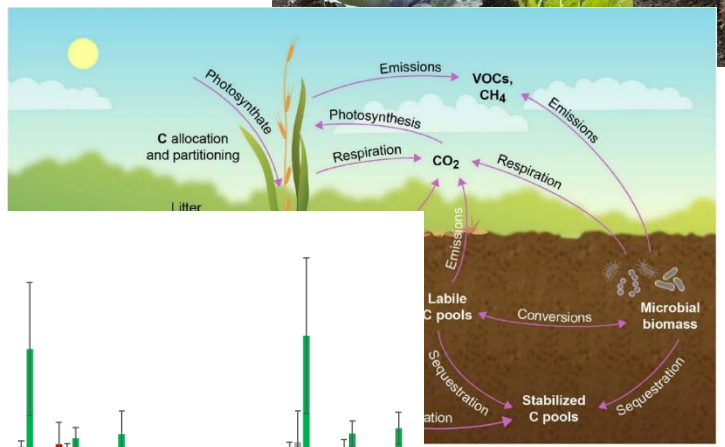
Kikas, K., Ostonen, I., Pihlap, E.

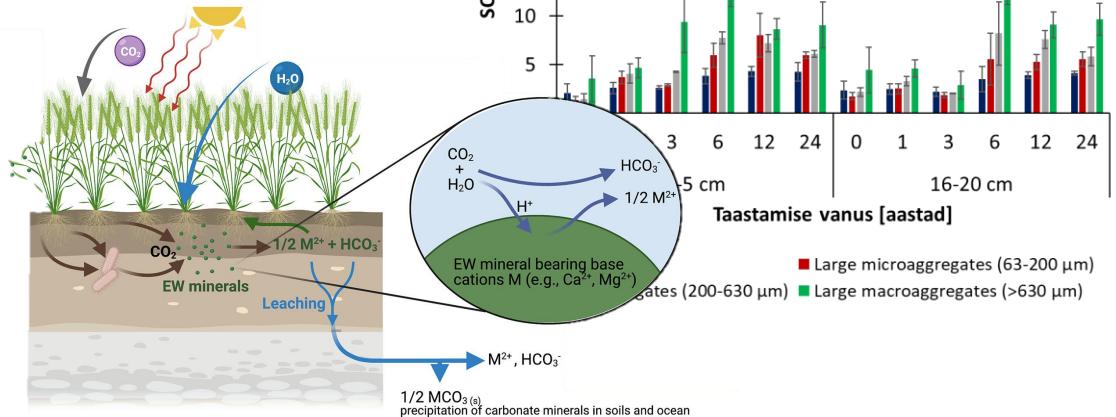
- Kuidas muutuvad mulla omadused ja kui suur on tegelik süsiniku talletamise määr maakasutuse muutusel?

Selline teadustöö on käimas, PRG2614 projekt „Majandamise, kliima- ja maakasutusmuutuste mõju metsade maa-alusele osale—lühi- ja pikaajalised nihked muldade orgaanilise süsiniku varudes ja voogudes“

Mida tänasest endaga kaasa võtta?

- Mulla kõige suurem väärtus meie jaoks on toidu tootmisel
- Muld on maismaa süsiniku ringluse „koduks“
- Looduslikku süsinikuringlust saame enda jaoks ära kasutada. Aga seda peab tegema kavalalt.
- Looduslikult on võimalik C-sidumist suurendada





Tänusõnad

Prof. Ingrid Kögel-Knabner
Dr. Markus Steffens
Helena Matus
Dr. Franziska Steiner
Michaela Henn
Gabi Albert

Prof. Noah J. Planavsky
Prof. David J. Beerling
Michael D. Masters
Dr. Ilsa B. Kantola
Noemma Olagaray
Dr. Boriana Kalderon Asael
Ayeesha Ahmed
Dr. Tobias Klöffel

Priit Penu
Elsa Putku, PhD
Tambet Kikas
Mart Laugis
Kristi Tomson
Virgo Rääts
Aare Papp

Prof. Ivika Ostonen
Kaasprof. Ain Kull
Karmel Kikas

Aitäh kuulamast!

evelin.pihlap@metk.agri.ee