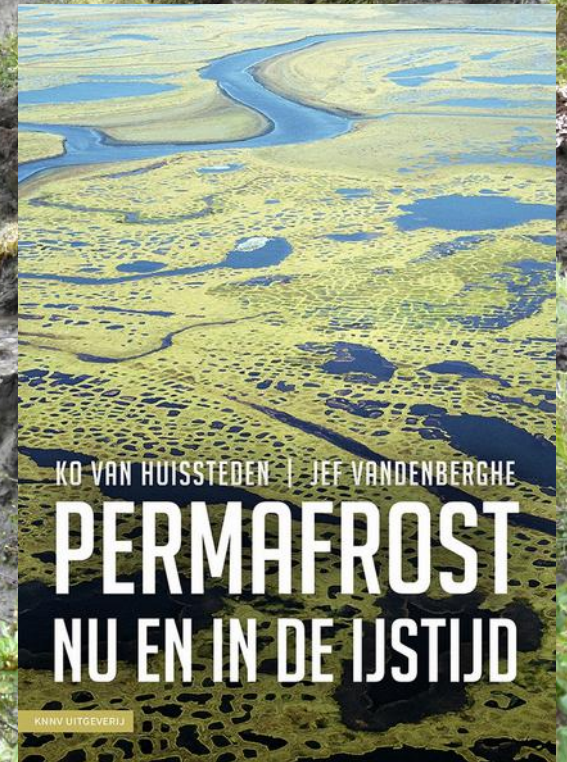
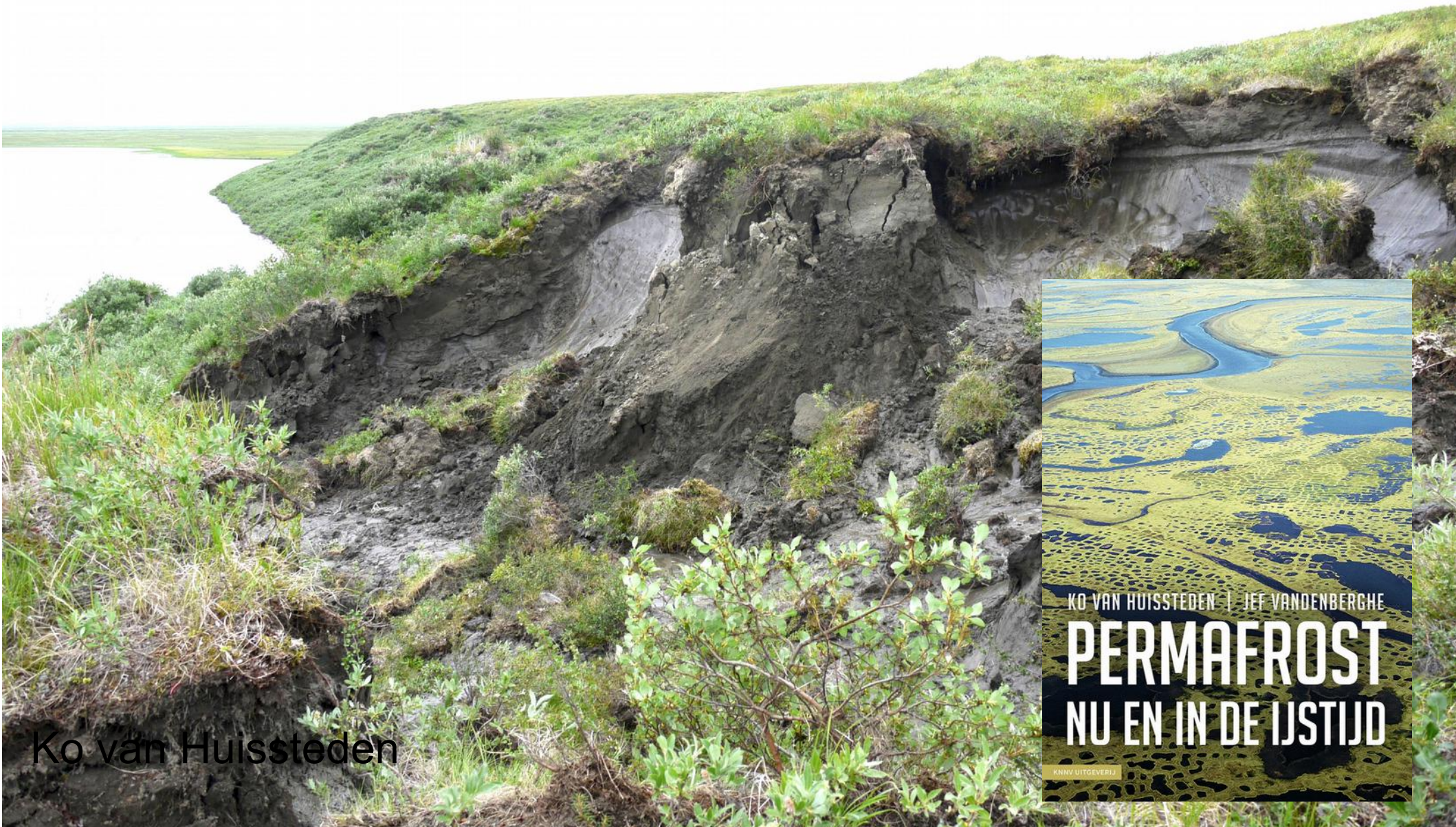


# Kantelpunt permafrost?



Ko van Huissteden

# Inhoud

**Wat is een kantelpunt en wat is permafrost?**

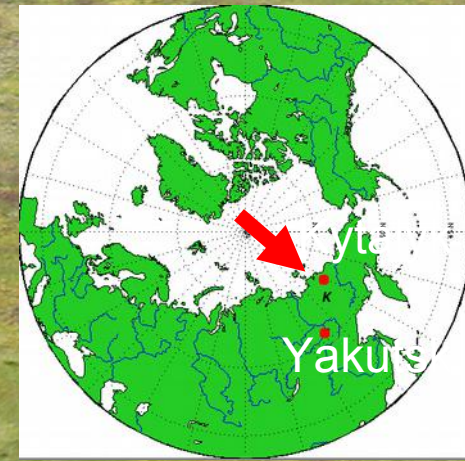
**Wat gebeurt er als permafrost ontdooit?**

- **Ecosysteem**
- **Landschap**
- **Broeikasgassen**

**Permafrost als kantelpunt - nu en in de ijstijd**

**inspiratiebron:**

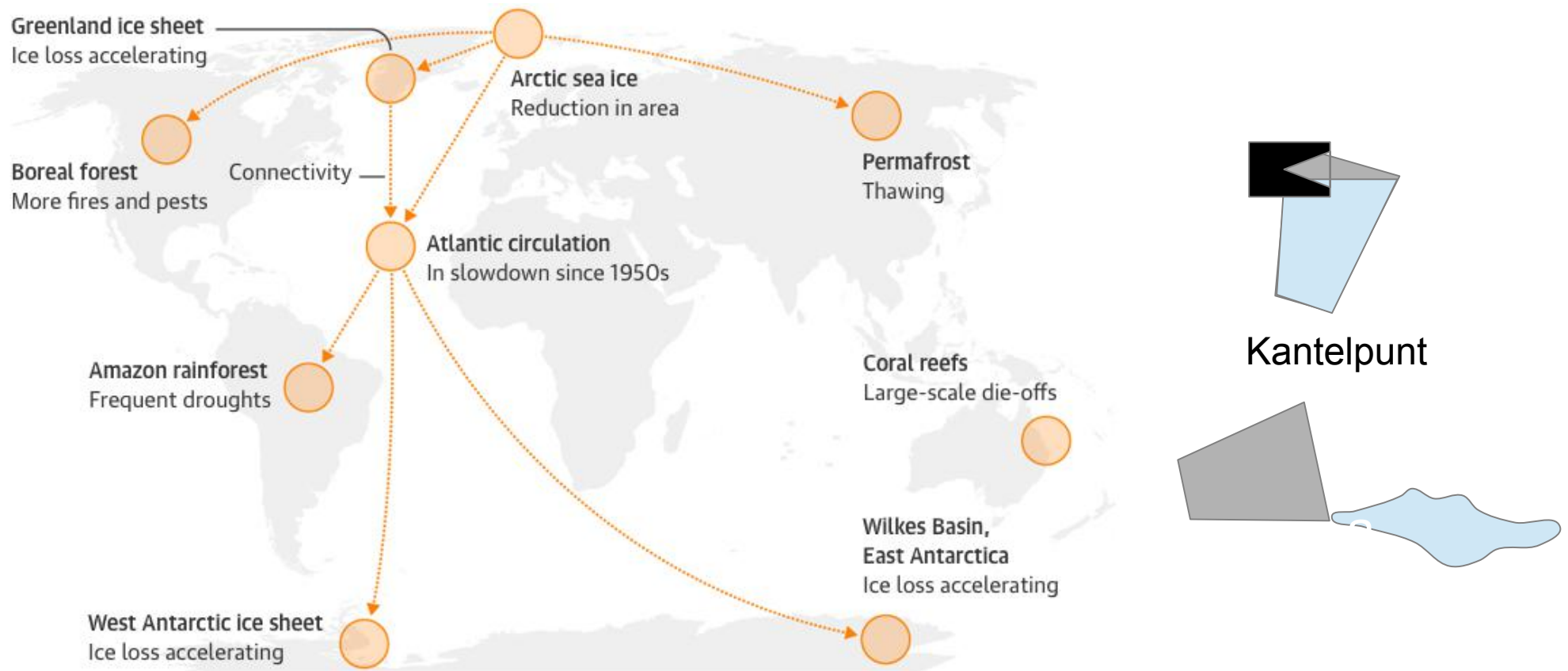
**ijstijd-permafrost onderzoek in Nederland  
14 jaar veldwerk in noordoost Siberië**



# Kantelpunten / Tipping points

een **kritieke drempel** in het (klimaat)systeem, bij overschrijding:

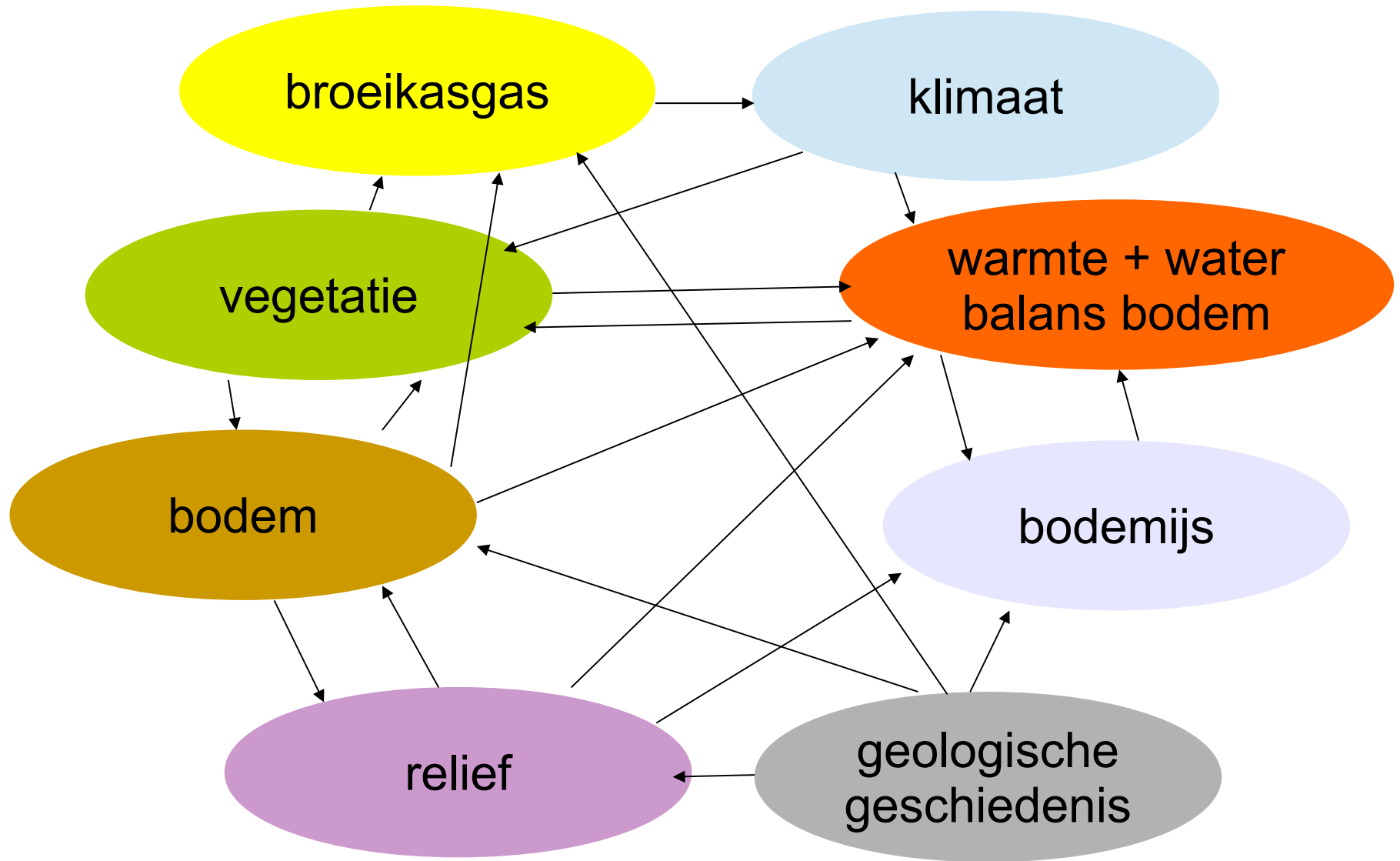
- een **abrupte verandering** van het systeem
- die **onomkeerbaar** kan zijn



Guardian graphic. Source: Lenton et al, Nature, 2019

Rockström, in:  
Thunberg:, The Climate Book

# Permafrost: een complex systeem

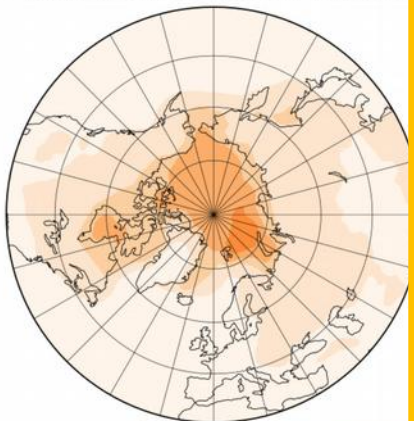


...waarin kantelpunten zich thuis voelen

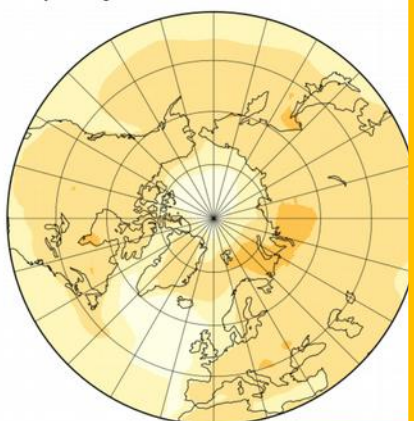
# Kantelpunten: in systemen met positieve terugkoppelingen

1.3 – 2.4o opwarming wereldwijd eind deze eeuw

TEMPERATUURVERANDERING WINTER SSP1-2.6 december-februari 2081-2100 tov 1986-2005

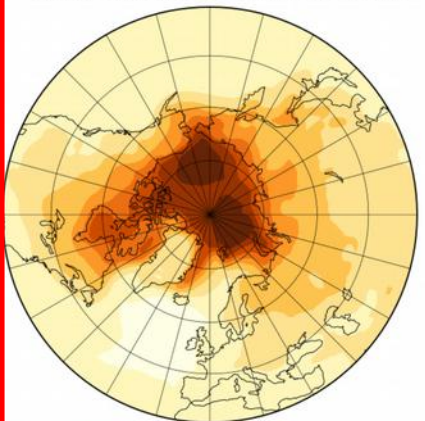


TEMPERATUURVERANDERING ZOMER SSP1-2.6 juni-augustus 2081-2100 tov 1986-2005

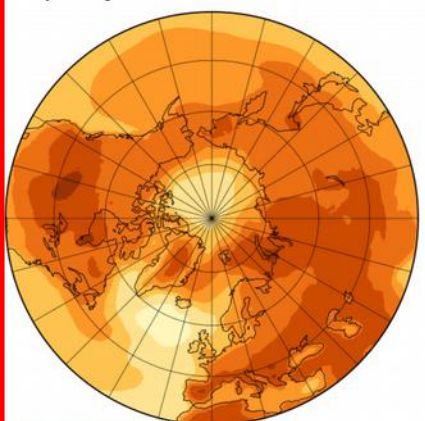


2.8 – 4.6o

TEMPERATUURVERANDERING WINTER SSP3-7.0 december-februari 2081-2100 tov 1986-2005



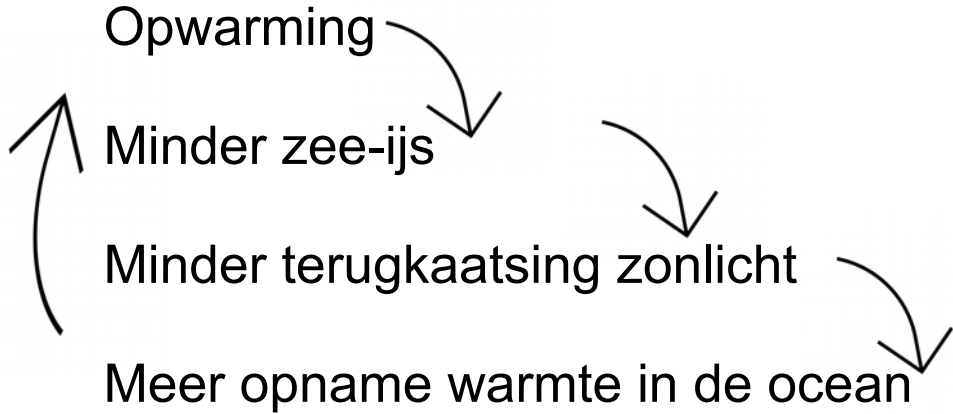
TEMPERATUURVERANDERING ZOMER SSP3-7.0 juni-augustus 2081-2100 tov 1986-2005



## IPCC 2021:

2o opwarming wereldwijd = tot 8o opwarming in de arctische gebieden

- meeste opwarming in winter
- ook toename neerslag



# Wat is permafrost?

Definitie: minimaal 2 jaar bodemtemperatuur  $< 0^{\circ}\text{C}$

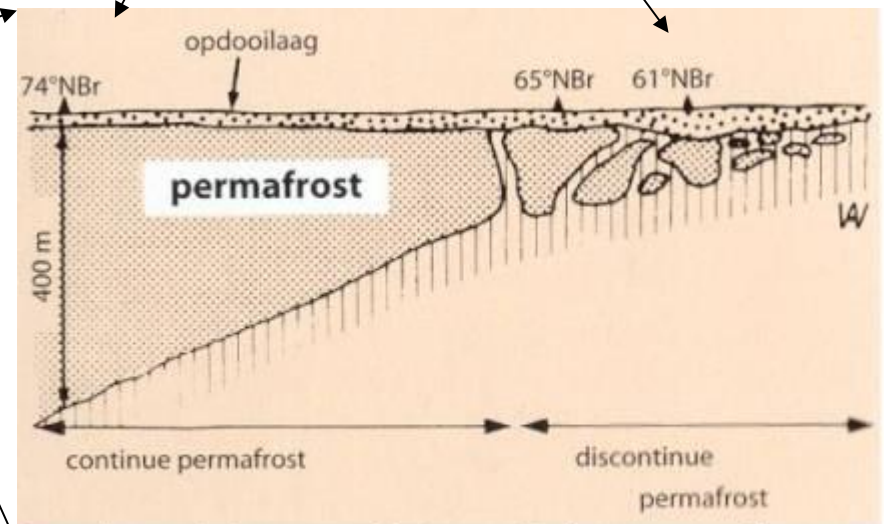
**24%** landoppervlak noordelijk halfrond: permafrost



Verticale dwarsdoorsnede:

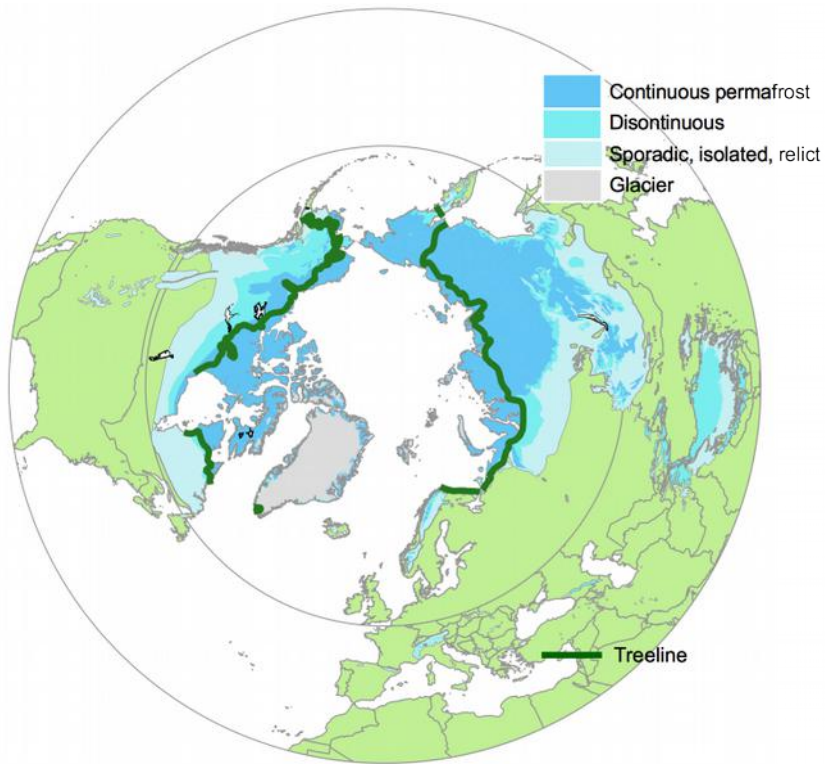
Continue permafrost

Discontinue permafrost



*Doorsnede van een bodem waar permafrost is opgetreden. De mate van permafrost neemt af naar mate de breedtegraad afneemt. Ook de opdoollaag is aangegeven.*

# Permafrost: niet alleen toendra



Poolwoestijn  
Toendra / heide  
Taiga/boreaal bos



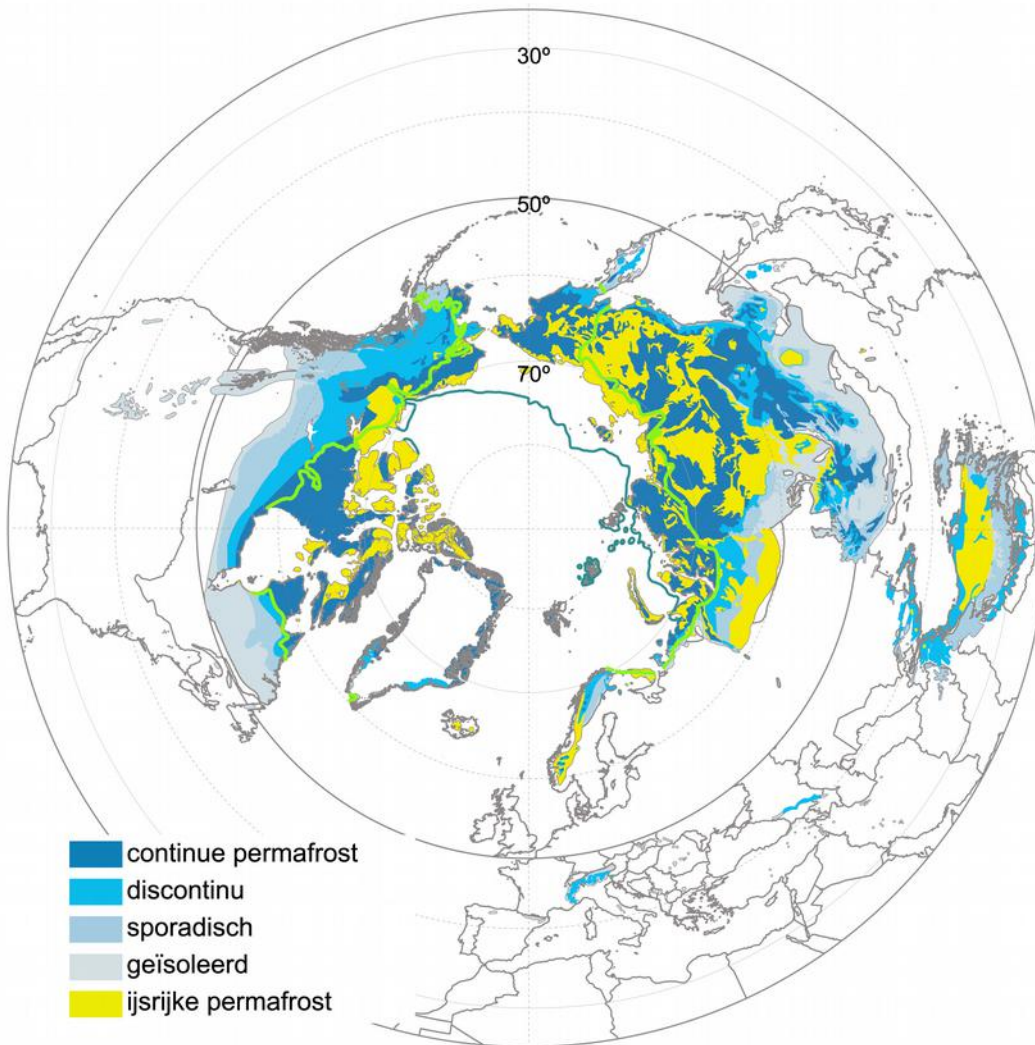
# Permafrost: moerassig



Geen infiltratie van water in een bevroren bodem



# Klimaatgevoelig ingrediënt I: Ijsrijke permafrost



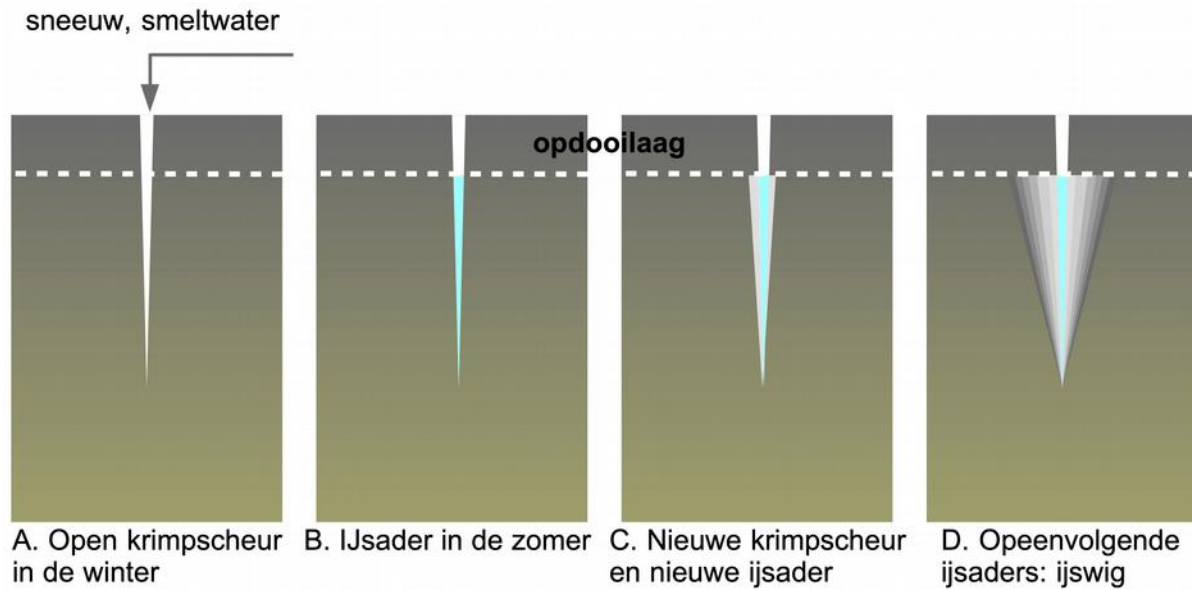
50 volume % of meer ijs  
> 90% komt voor

ijslenzen

ijswiggen

begraven ijs  
(meer/rivier, gletsjer)

# IJslenzen en ijswiggen



Ijswiggen: krimpscheuren door winterkou raken opgevuld met ijs



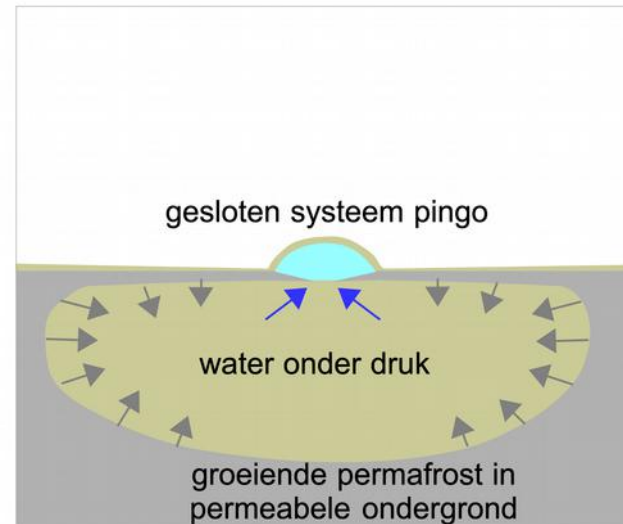
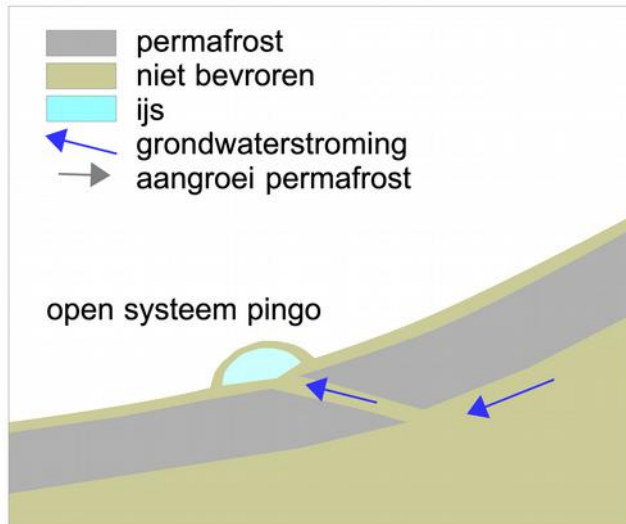
Ijslenzen: water wordt naar bevriezingsfront getrokken

# IJswiggen van boven



Een polygoenen-patroon  
van krimpscheuren

# Pingo's: bevroren bronnen



# Kryoturbatie: vervloeiide bodem

Bodem raakt oververzadigd met water in de zomer



NO Siberie



Spitsbergen



Yamal

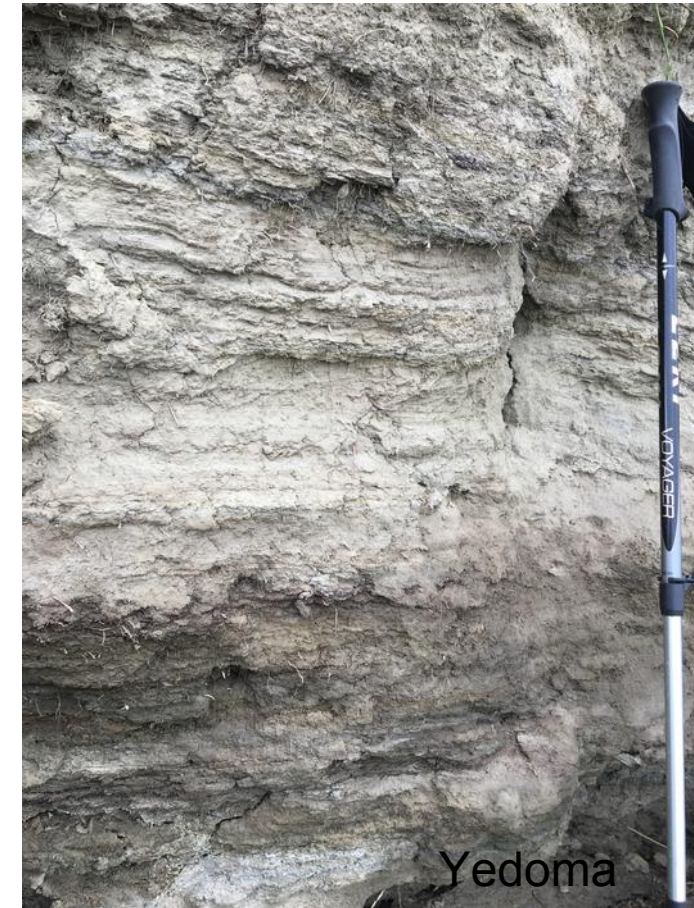
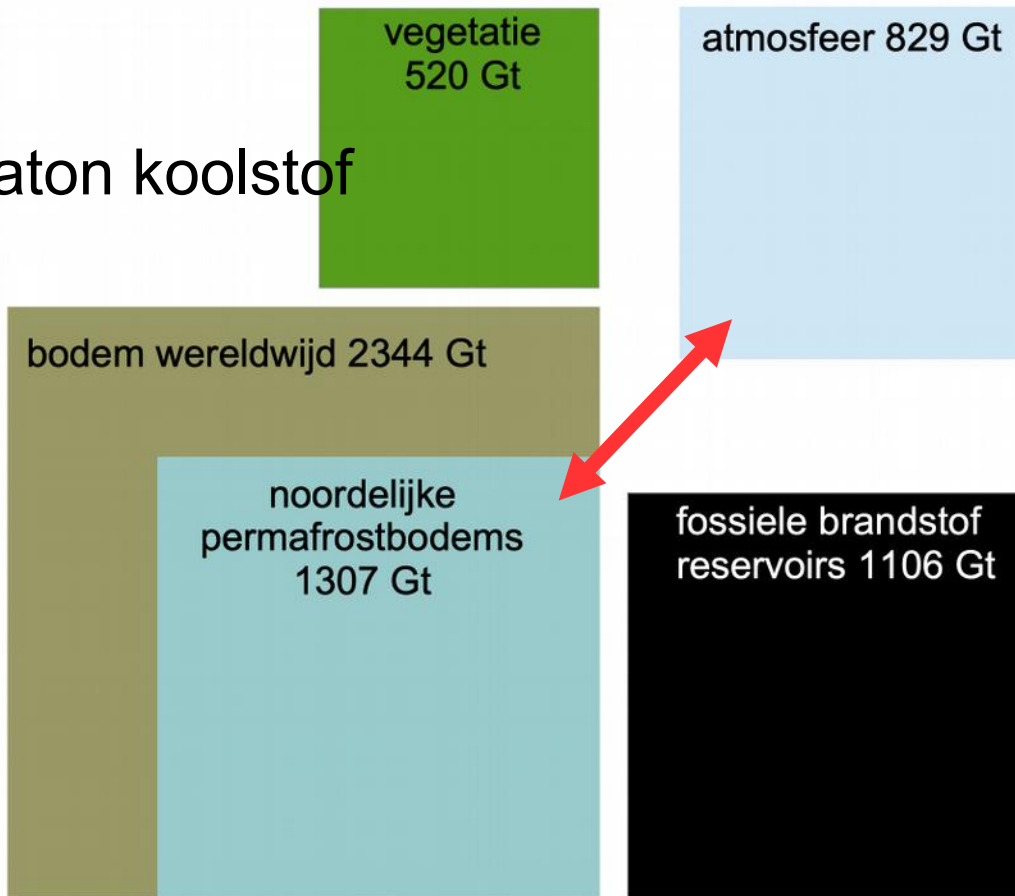


Gorsseelse heide

# Klimaatgevoelig ingrediënt II: fossiel koolstof

## Bron van broeikasgassen

Gt = Gigaton koolstof



- Veen: Canada, West-Siberië
- Rivier- en delta afzettingen
- IJstijd-löss ('Yedoma') in Oost-Siberië, Alaska
- Methaan, methaanhydraat

# Welke broeikasgassen?

## **Permafrost – Carbon feedback:**

uitstoot broeikasgas uit permafrost versterkt opwarming klimaat

**CO<sub>2</sub>** lange verblijftijd in de atmosfeer

**CH<sub>4</sub>** (methaan): opwarming 28 x CO<sub>2</sub> - korte verblijftijd

**N<sub>2</sub>O** (lachgas): 273 x CO<sub>2</sub>

**Ecosysteem:** versnelling koolstofcyclus ecosysteem - CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>

**Fossiel:** Omzetting fossiele bodemkoolstof naar CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O

**Geologie:** Permafrost laat CH<sub>4</sub> uit diepe ondergrond door

# Warmtebalans van de bodem

## Winter:

geen warmte van de zon  
helder weer: uitstraling + afkoeling  
dik sneeuwdek isoleert bodem



## Zomer:

zonnewarmte  
vegetatie: schaduwwerking  
natte bodem / waterlaag:  
sneller warmtetransport in de bodem

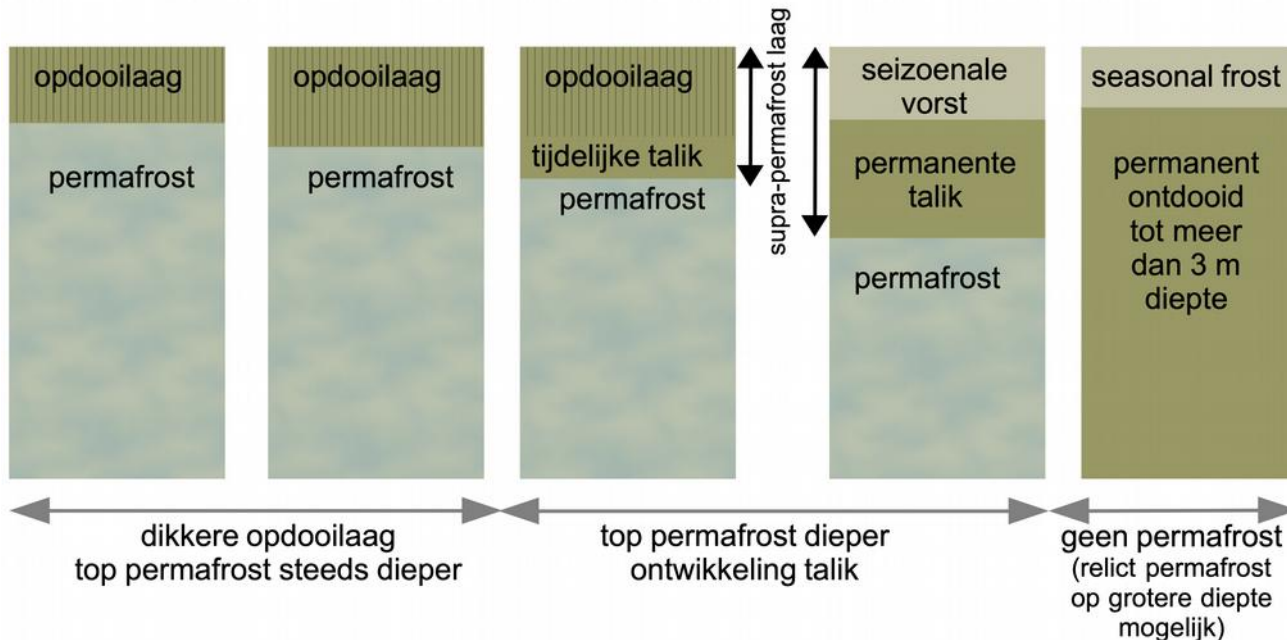




# Hoe ontdooit permafrost?



Normale zomer-winter cyclus



## Permafrost dooi:

hogere bodemtemperatuur

dikkere opdooilaaag

verlies bodemijs, bodemdaling

meer grondwaterstroming  
(= warmtetransport)

dikkere opdooilaaag  
top permafrost steeds dieper

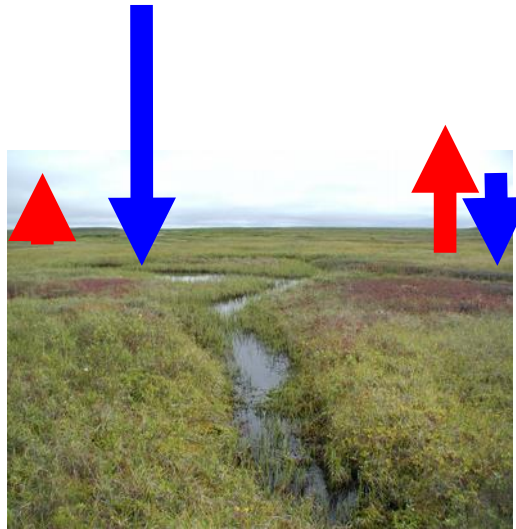
top permafrost dieper  
ontwikkeling talik

geen permafrost  
(relict permafrost  
op grotere diepte  
mogelijk)

# Broeikasgas-balans ecosysteem

## Opname CO<sub>2</sub> door fotosynthese vegetatie

CO<sub>2</sub> :  
afbraak organische  
stof uit bodem



CH<sub>4</sub> uit natte bodem  
(moerasgas)

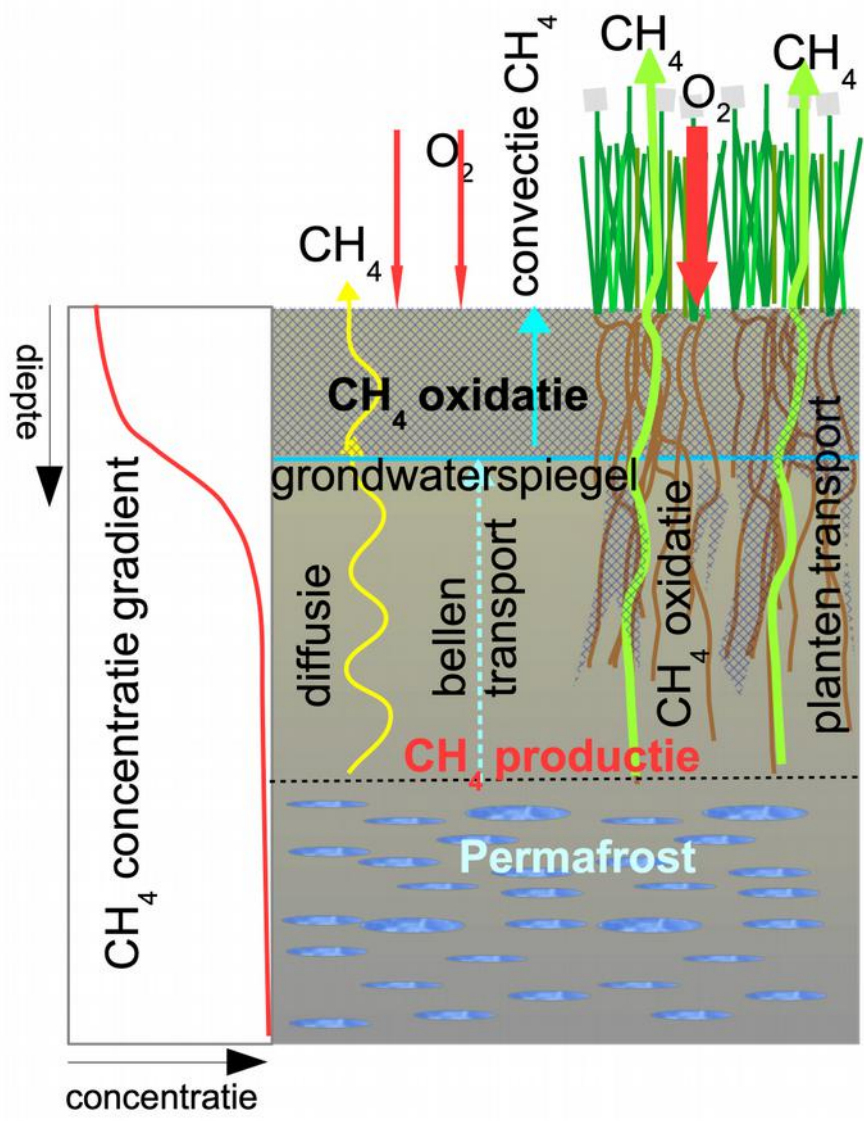
Droge bodem:  
geringe opname CH<sub>4</sub>

vastlegging CO<sub>2</sub>-C  
in planten en veen

verlies C door opgeloste  
organische stof via water

# Ecosysteem methaan: gestuurd door vegetatie

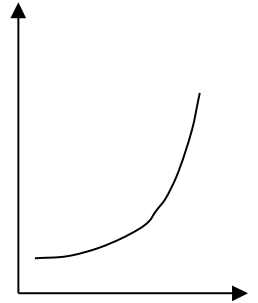
Balans tussen productie CH<sub>4</sub>, bacteriële oxidatie, transport door planten



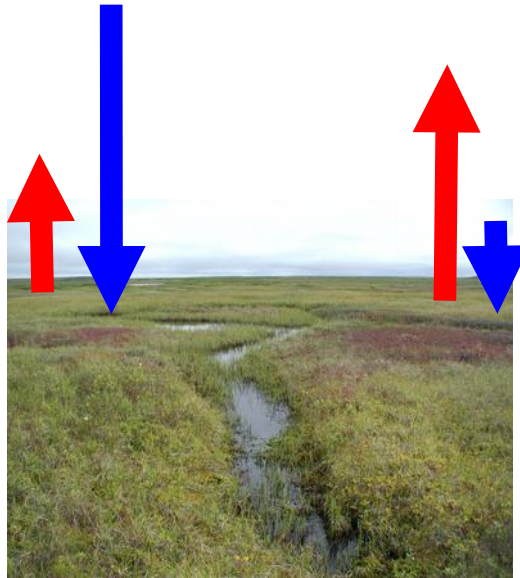
- uitscheidingsproducten wortels = voedsel voor methaanvormers (Archeae)
- transport naar de lucht via wortels, stengels
- **Veenmossen:**  
oxidatie CH<sub>4</sub> door symbiose methanotrofe bacteriën in mosplantjes

# Versnelling koolstofcyclus bij opwarming

1. Bacteriële activiteit neemt exponentieel toe
2. Langer / warmer groeiseizoen: meer fotosynthese



CO<sub>2</sub> :  
afbraak organische  
stof **neemt toe**



CH<sub>4</sub>  
**meer productie**

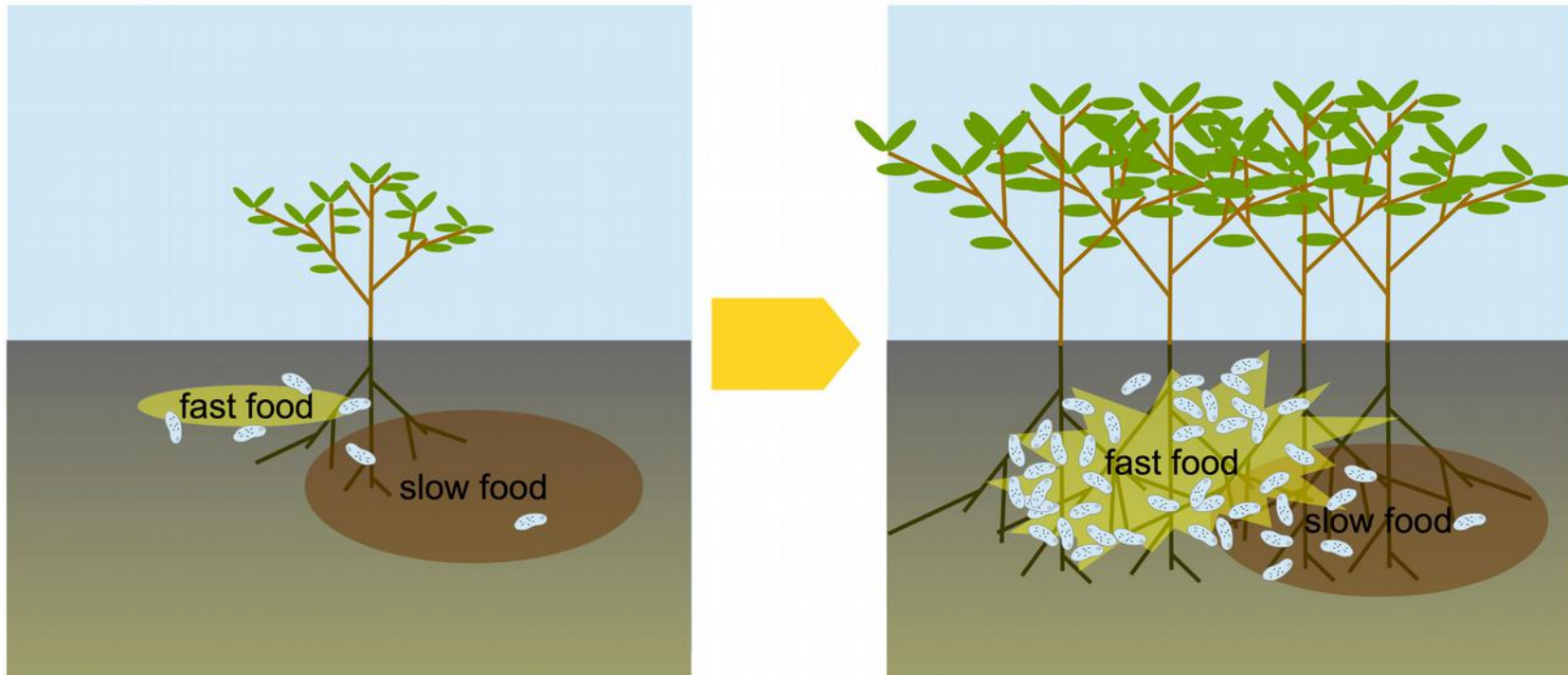
10 jaar CO<sub>2</sub> metingen in toendra noordoost Siberë:

1. opname door planten neemt toe (langer groeiseizoen),
2. afbraak van organische stof compenseert dit

(Parmentier et al., 2014)

# Effect 'Arctic Greening'

Toename vegetatie, bomen en struiken: meer opname CO<sub>2</sub>



**Priming effect:** het 'aanmaakblokje' voor oude bodemkoolstof meer snel afbreekbare organische stof (wortelexudaten) = snellere afbraak oude, stabiele humus

**Meer verdamping:** drogere bodem, minder CH<sub>4</sub>, meer CO<sub>2</sub>

**Netto:** minder *bodemkoolstof*, meer koolstof in *vegetatie*

# Riviervlakten: steeds natter

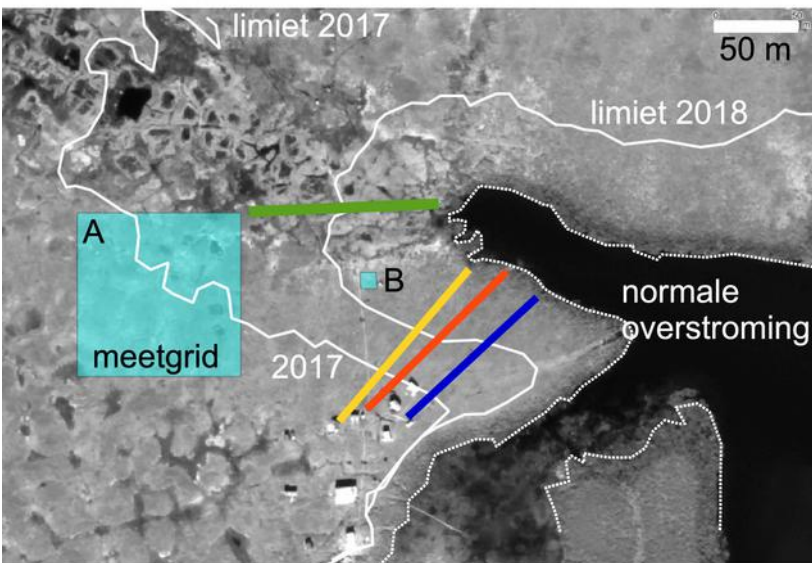
Toename neerslag in Siberië

Overstromingen:

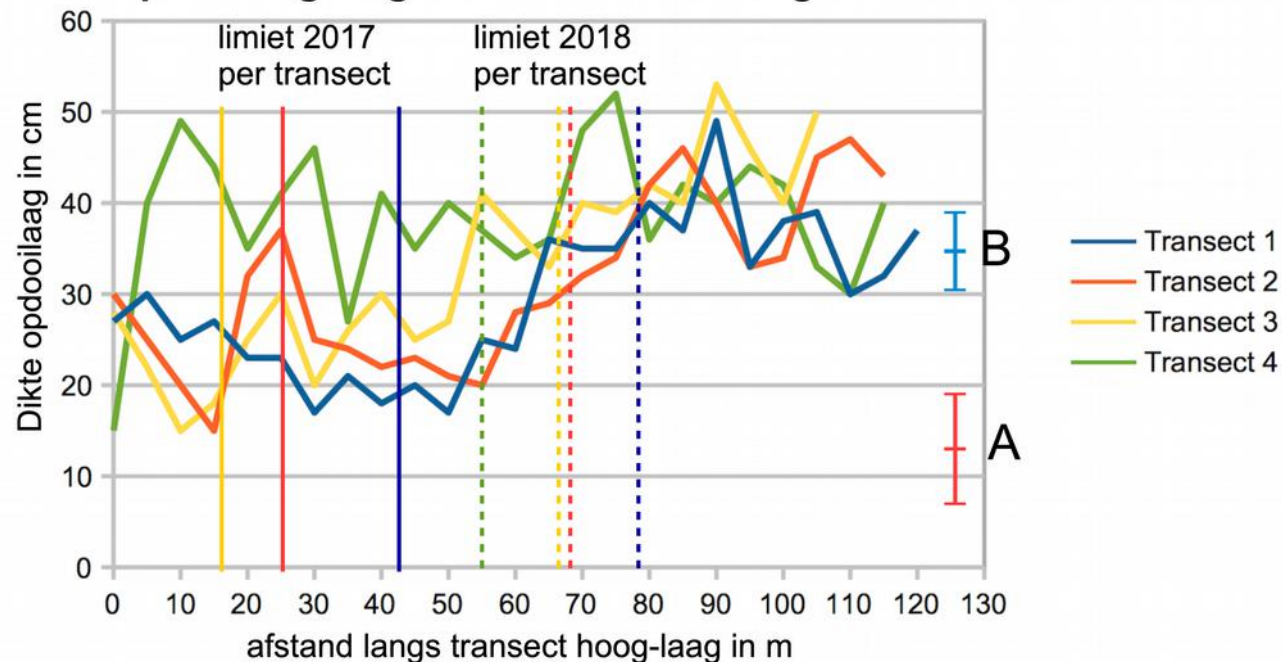
Dooi bodemijs, bodemdaling, nattere rivierlake



Rivierlake-vegetatie Siberië: **7 x meer CH<sub>4</sub>** als natte toendra

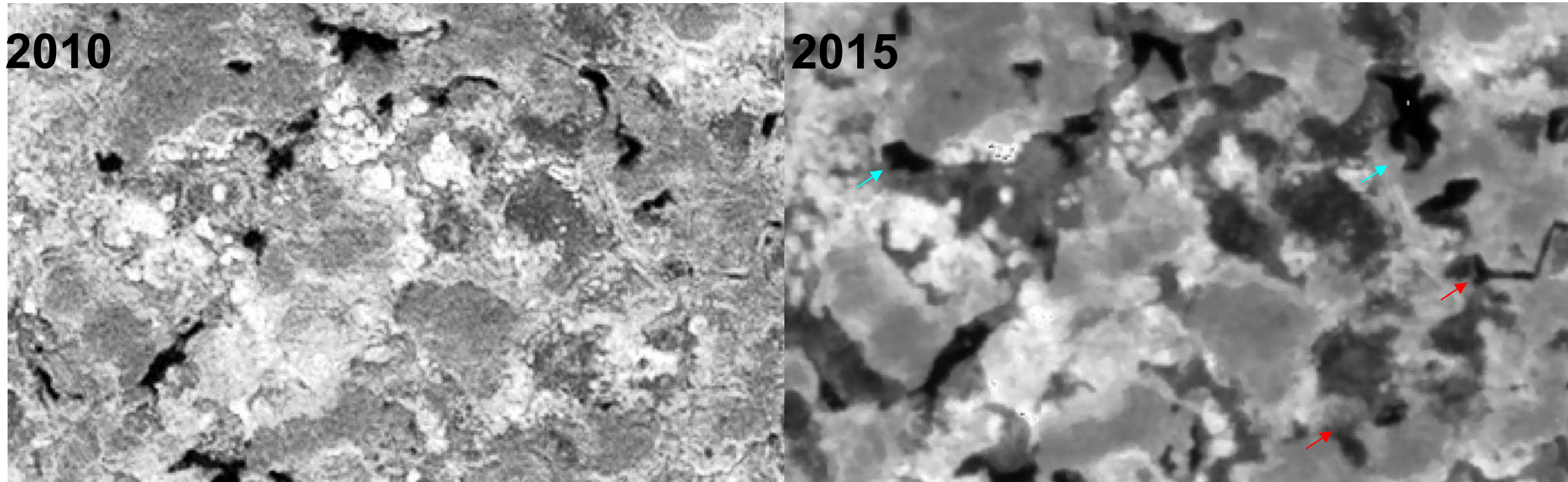


Dikte opdoollaag langs transecten en meetgrids A en B



# Ontdooien van ijsrijke permafrost

**Satellietbeelden Siberië: 2 – 3 x toename poelen in 5 jaar**



# Oppervlakkige dooi: poelen

- Ontdooien bodemijs > poelen
- Afsterven droge vegetatie
- Natte bodem = warmtetransport de bodem in
- Meer permafrost dooi

**Omzetting organische stof naar CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>.**

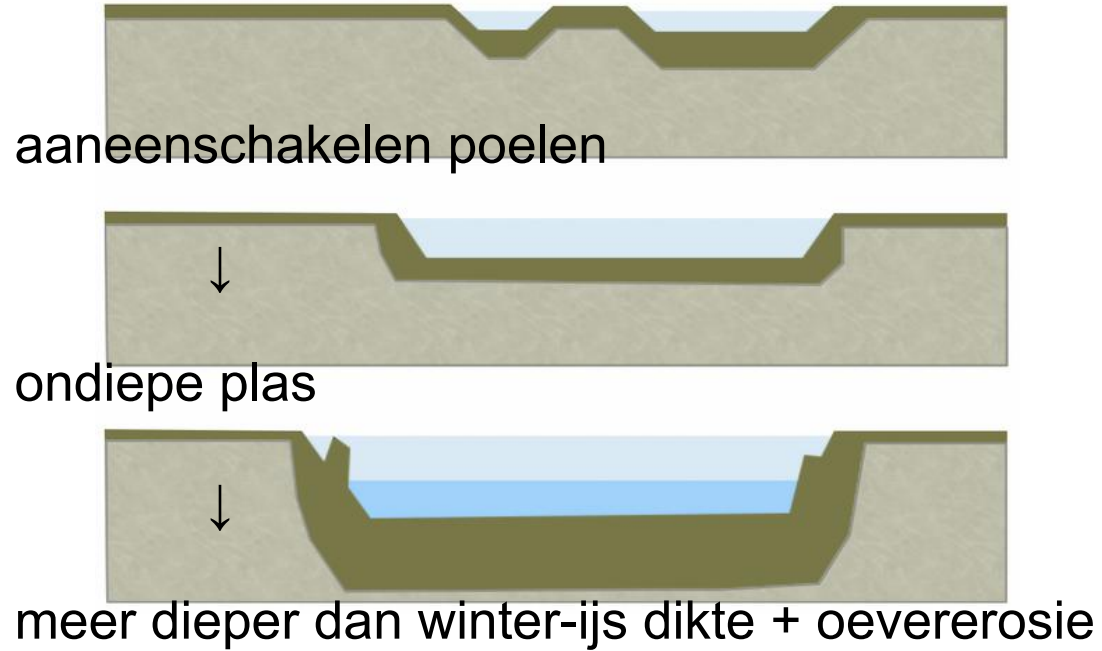




# Dooimeren



Fedorov et al. 2014



Dooi van fossiele organische stof onder dooimeren:

Vorming van methaan - CH<sub>4</sub>



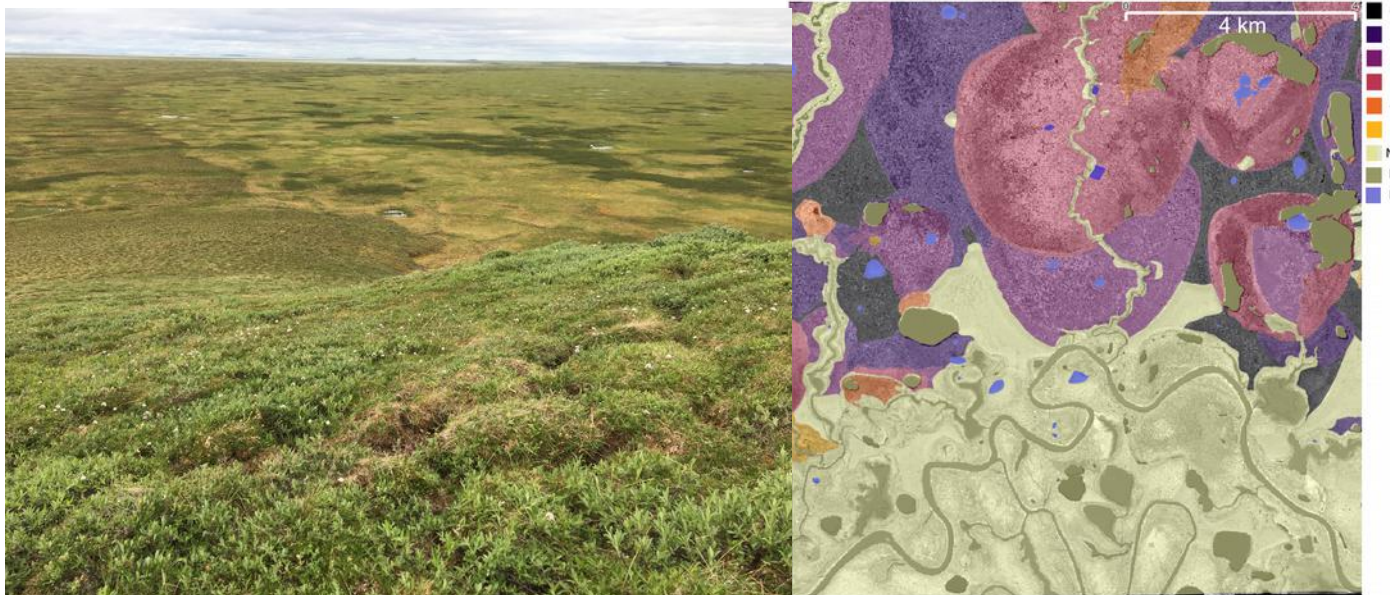
# Oevererosie; bron van organische stof voor CH<sub>4</sub>



# Dooimeren – breiden ze zich uit?

## 'Dooimeercyclus'

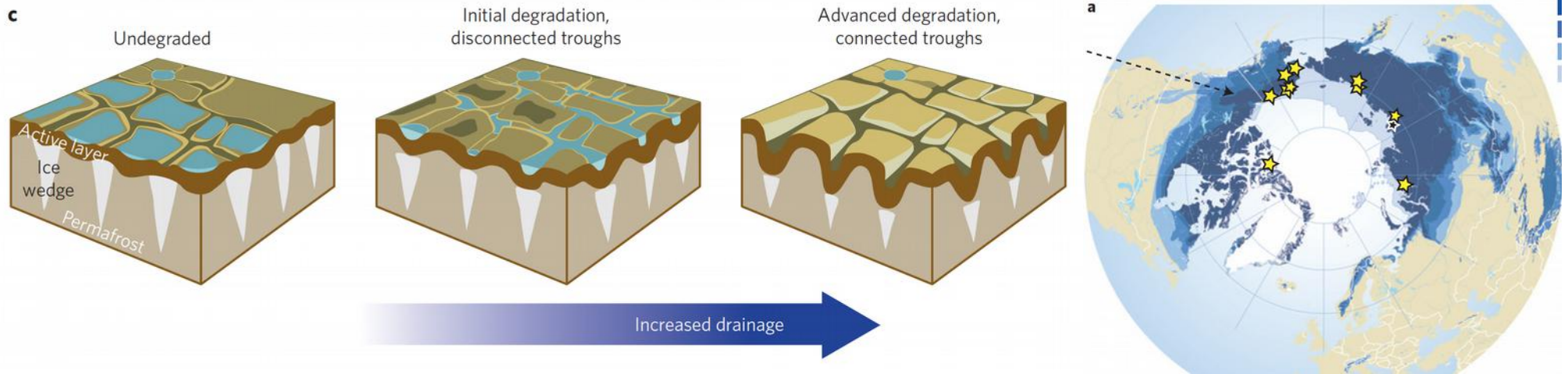
herhaald leeglopen en nieuwvorming van meren



Dooimeer vorming op grote schaal: ***einde laatste ijstijd***

Nu: groei bestaande meren  
groei ondiepe poelen naar nieuwe meren  
leeglopen van oude, grote meren

# Erosie



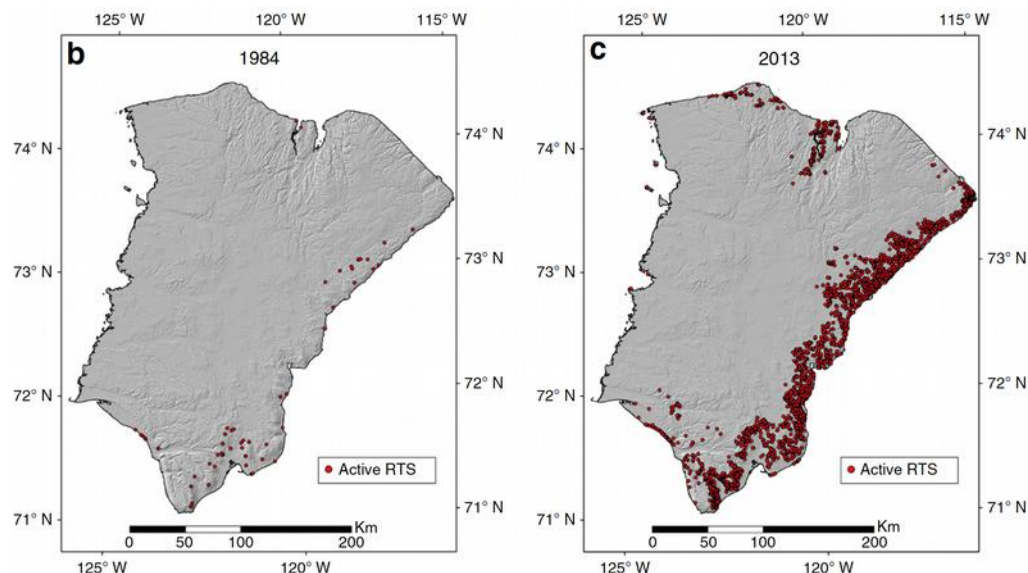
## Toename erosie langs ijswiggen

(Liljedahl et al., 2016)

Waterafvoer versnelt, natte bodems droger

Minder CH<sub>4</sub>, maar veel meer CO<sub>2</sub> door oxidatie veenbodems

# Snelle toename erosie



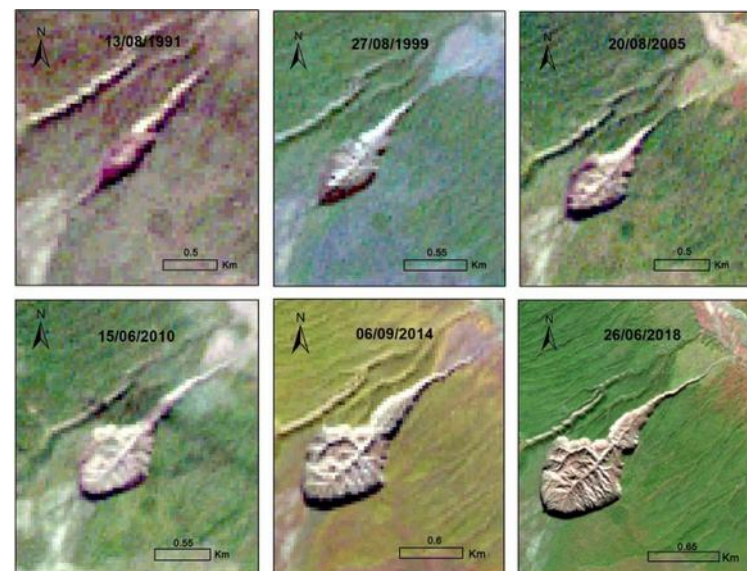
Banks Island, NW Canada: **60-voudige** toename aardverschuivingen  
(Lewkowicz & Law, 2019)

## Batagay megaslump Siberië:

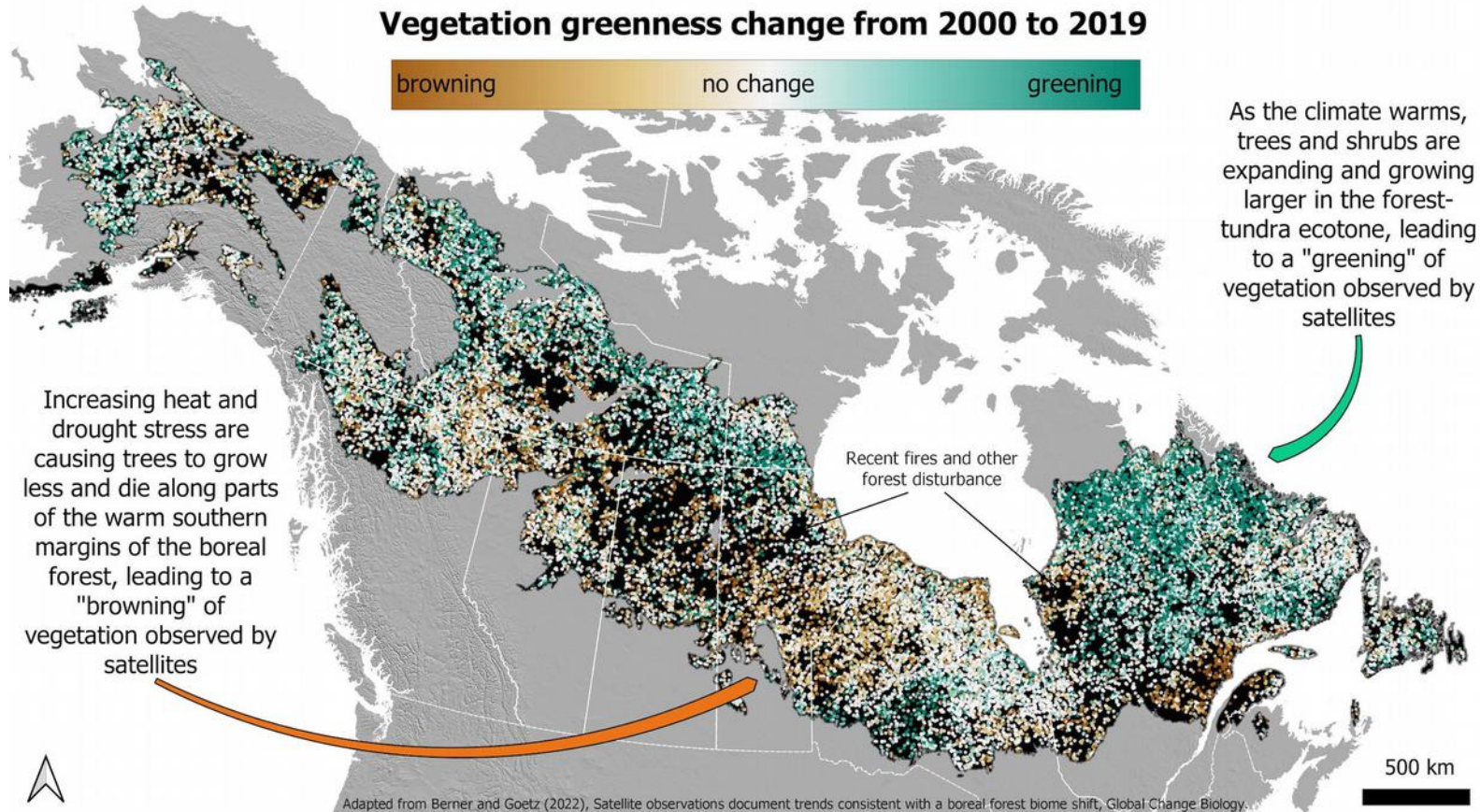
door ontbossing ontstaan

800 m breed, erosie 15 m/jaar

doei 25 miljoen m<sup>2</sup> permafrost per jaar



# Geen Arctic Greening maar Arctic Browning



Vernatting  
Extreem weer  
Insectenplagen  
Toename bos/toendra branden  
Erosie

# Erosie + broeikasgassen



Snelle veranderingen over grote oppervlakten: **kantelpunt**

Broeikasgassen:

snelle omzetting organische stof in oxiderend milieu: CO<sub>2</sub>  
ook lachgas (N<sub>2</sub>O) komt vrij door snelle oxidatie

# Kan het ecosysteem herstellen?

Poel, dode dwergberken  
**Hoge** CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> emissie



Droge dwergberk-heide  
op ijsrijke permafrost  
CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> opname



Magnússon et al., 2021

Nieuwe vegetatie: CO<sub>2</sub> opname  
Veenmos: CH<sub>4</sub> emissie neemt af  
IJs in de bodem groeit weer aan

Teruggroeien bodem-koolstof duurt **tientallen - honderden jaren**

*Veel + snelle verstoring = erosie + vernietiging vegetatiedek*



# Kan het ecosysteem herstellen?

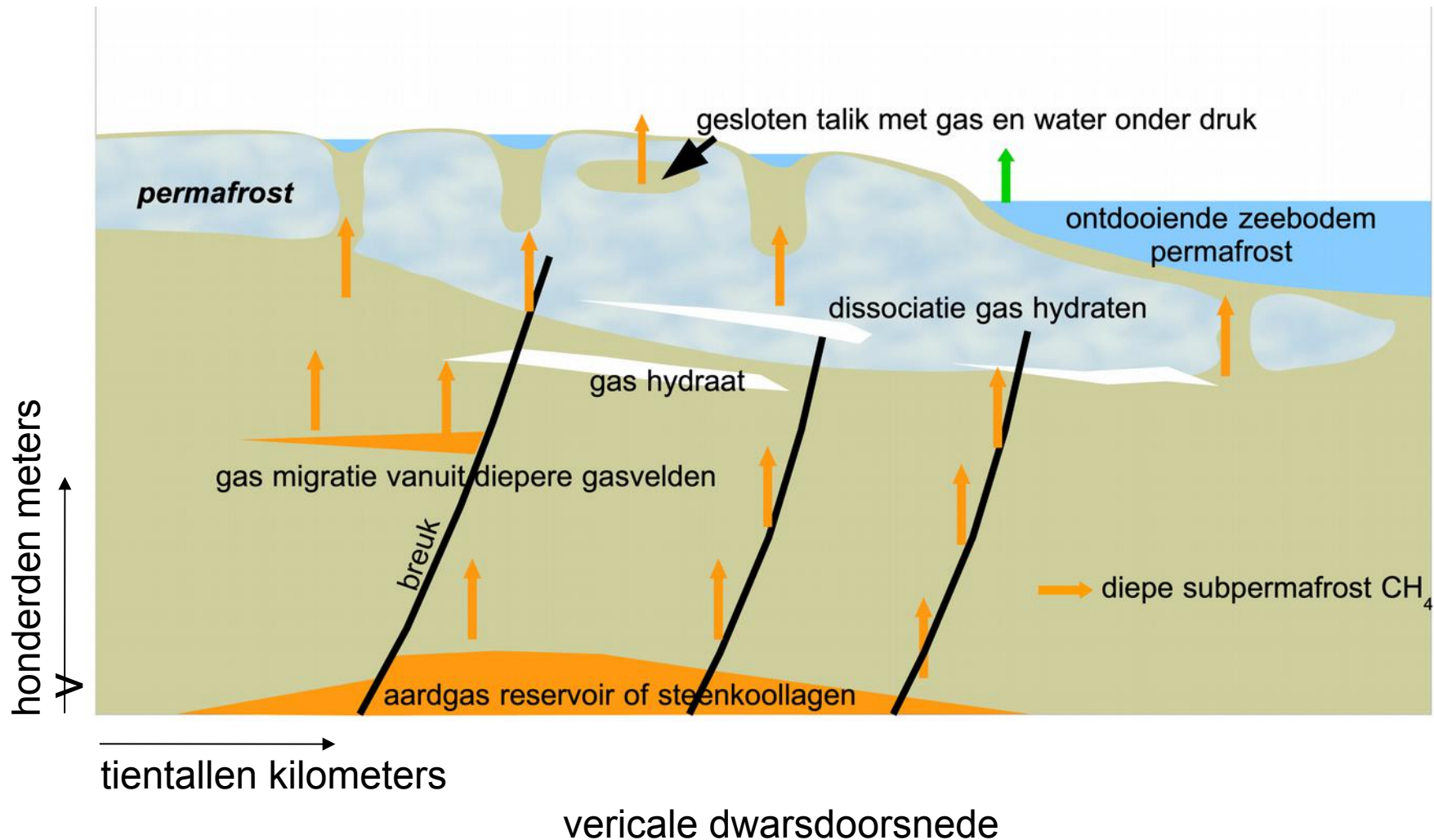


Pioniervegetatie na erosie is er snel  
Herstel koolstofvoorraad bodem duurt eeuwen

# Geologische methaanbronnen

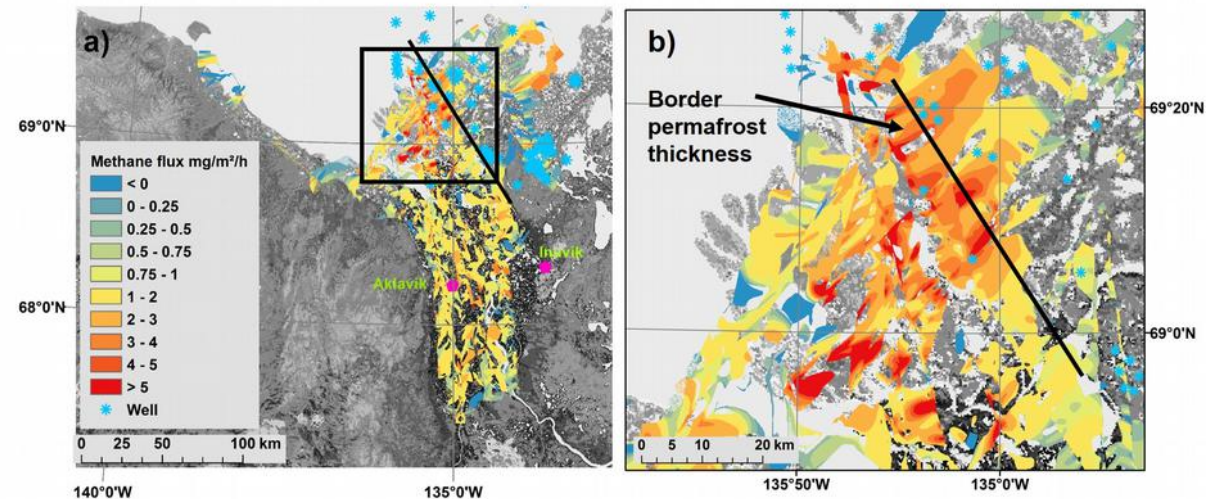
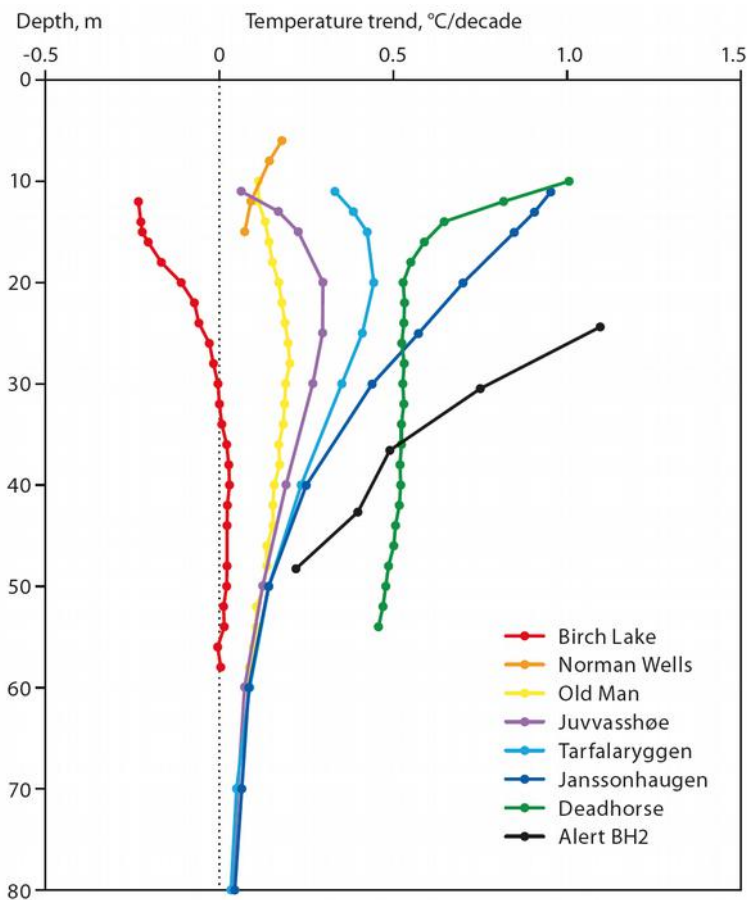
Gasreservoirs in 'taliks' onder voormalige dooimeren

Gashydraten: methaan en water in ijsvorm



# Ook diepe permafrost warmt op

Diepe permafrost warmt op: Toename gasmigratie



Kohnert et al 2017:

Gas uit meren en riviergeulen Mackenzie delta meeste emissie waar permafrost relatief dun is

# Een onaangename verrassing



2014: ontdekking kraters in de permafrost tot 80 m diep  
Explosieve methaan-uitbarstingen  
Nieuw verschijnsel (Leibman et al., 2015)



# Permafrost laatste ijstijd

(Inter)stadialen

Holoceen

Allerød / Jonge Dryas

LGMax polar desert <-6°

Denekamp boomloos

Hengelo boomloos

Hasselo jaartemperatuur <-6°

Moershoofd boomloos 15°-10--18°

Schalkholz polar desert <-6°

Odderade bor. bos 8-12° /-11-22°

Rederstall boomloos, 15°, -19°

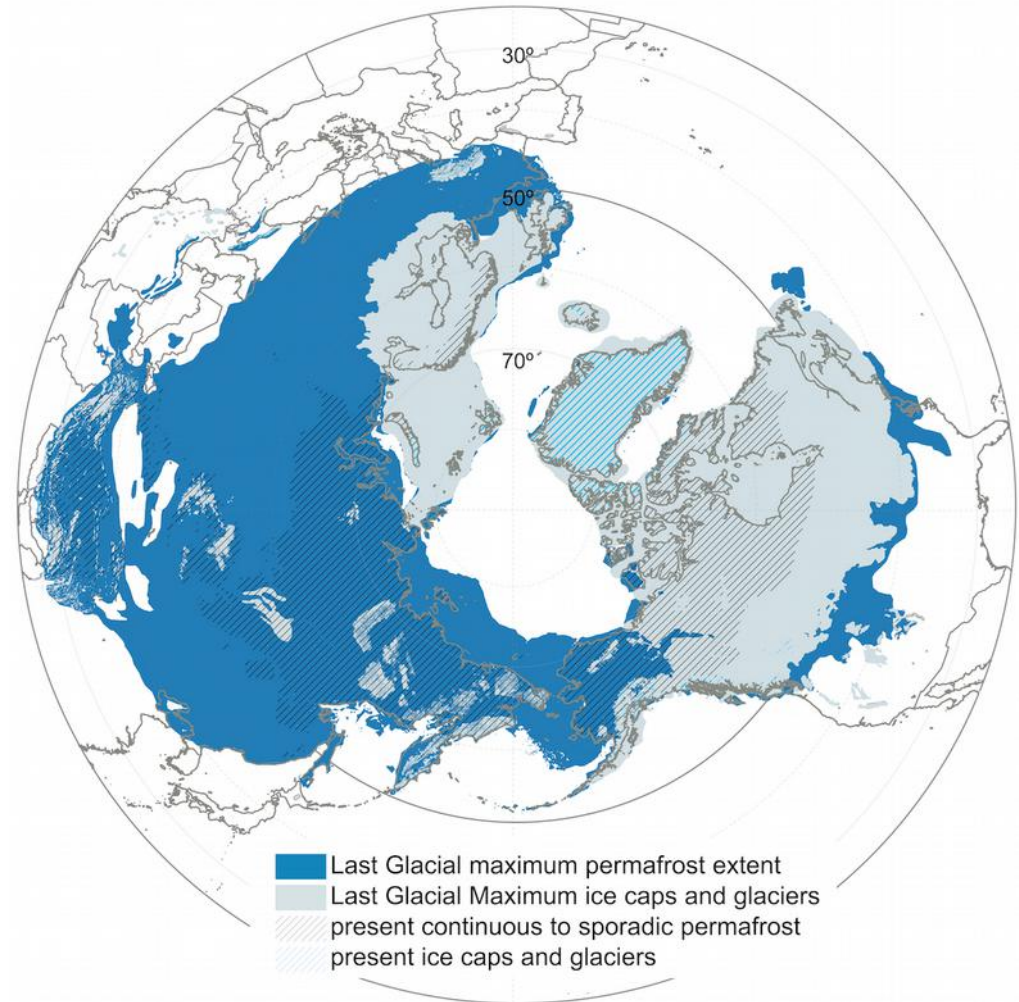
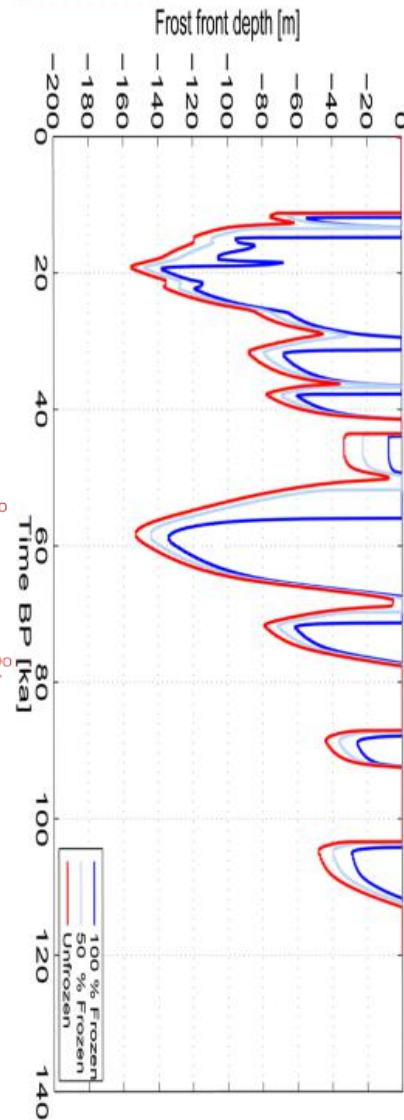
Brörup boreaal bos 15-19° /  
-8--14°

Herning boomloos, 15°, -19°

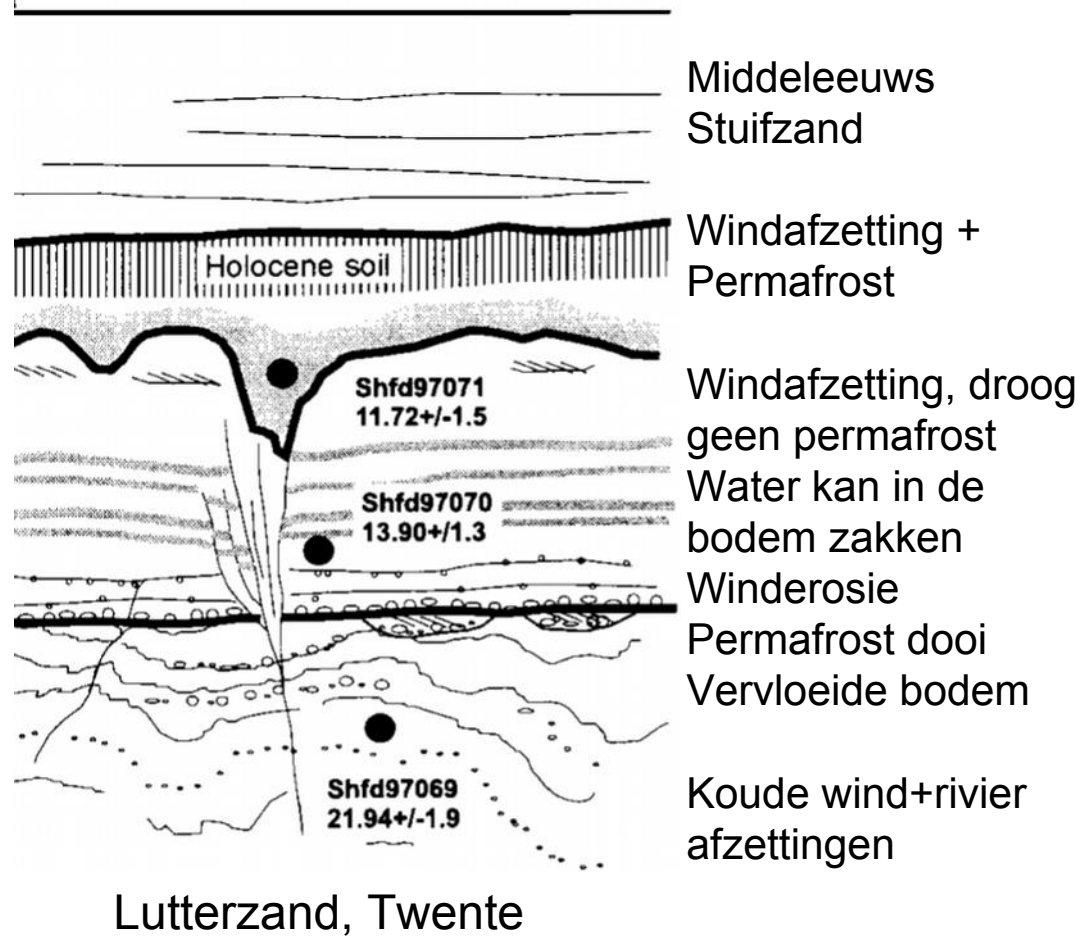
Eemien bos, 16-19°, -1-5°

## Permafrost model

Govaerts et al., 2016

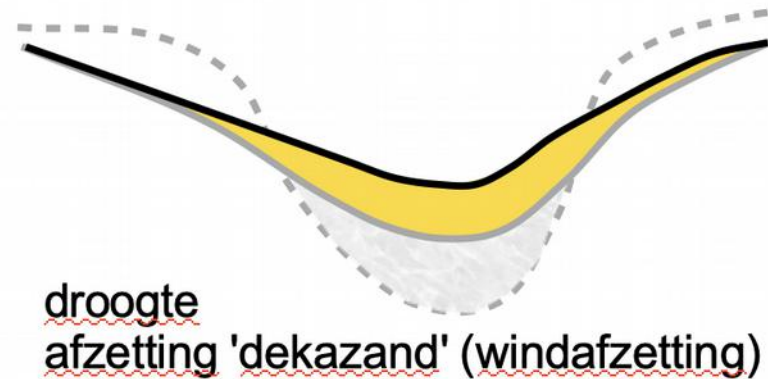
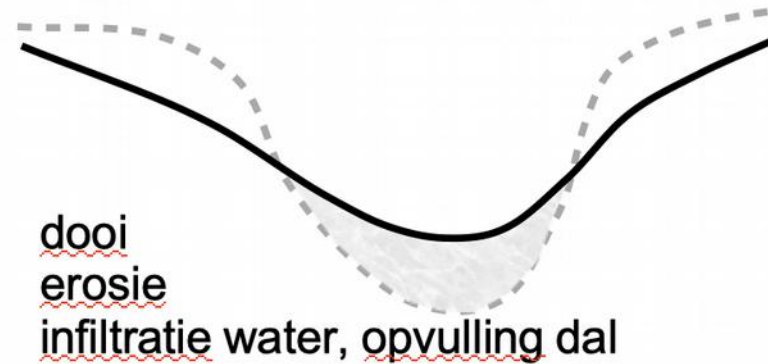
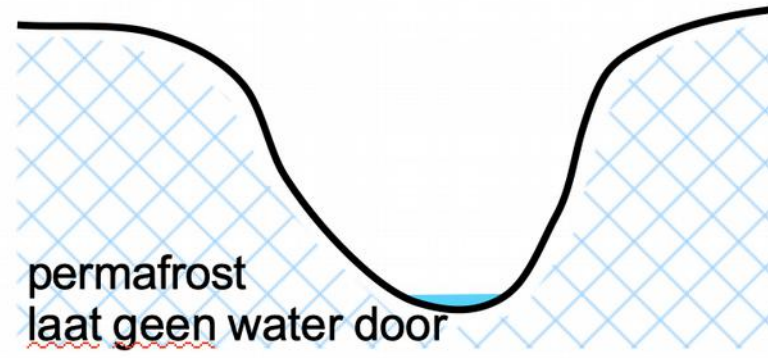


# Ecosysteem-verstoring door dooi permafrost-ijstijd



Hengelo, vervloeiing bodem door permafrost dooi (kryoturpatie)

# Droge dalen Veluwe



# Dooimeren in Nederland



toendrabodem  
met cryoturbatie  
en ijswigopvulling  
 $\pm 35\ 800$  jaar

delta structuren:  
oever platform

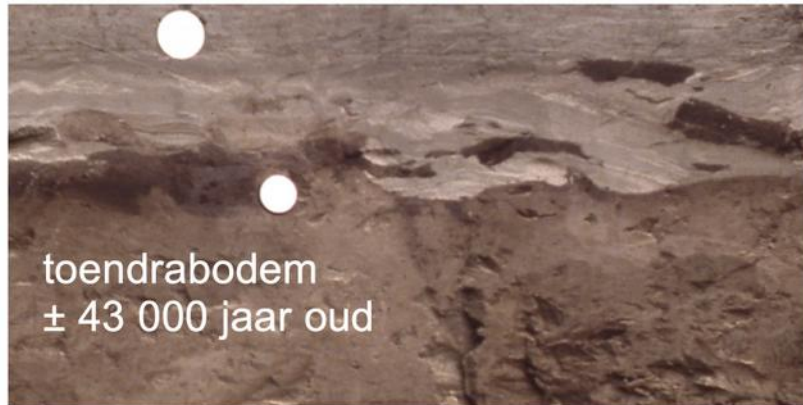


meerafzetting:  
zandige leem  
(dieper water)  
 $\pm 37\ 900$  jaar

meeropvulling  
2,5 m

$\pm 4$  m

Detail erosieniveau



toendrabodem  
 $\pm 43\ 000$  jaar oud

opvulling ijswig

zandige leemlaag



geel afzetting;  
erosie ijswig



# Een rol voor gas bij pingoruïnes in Drenthe?



Boortorens en caravans verdwenen in de bodem bij 't Haantje (Rechten: Archief RTV Drenthe)

Blowout gasboring 't Haantje  
(december 1965;  
lekt nog steeds methaan)

- Gasvelden aanwezig, hoge druk
- Weichsel permafrost relatief dun
- Geen duidelijke randwal bij pingoruïnes

Speculatief: ontgassing van ontdooiende Weichselien permafrost?



# Sterkte permafrost-koolstof terugkoppeling

**Schattingen met modellen lopen ver uiteen**

**± 10% permafrost koolstof als CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> naar de atmosfeer in deze eeuw  
meest als CO<sub>2</sub>**

op jaarbasis: ± 10% van emissie fossiele brandstoffen

(Schuur et al., 2015, Nature)

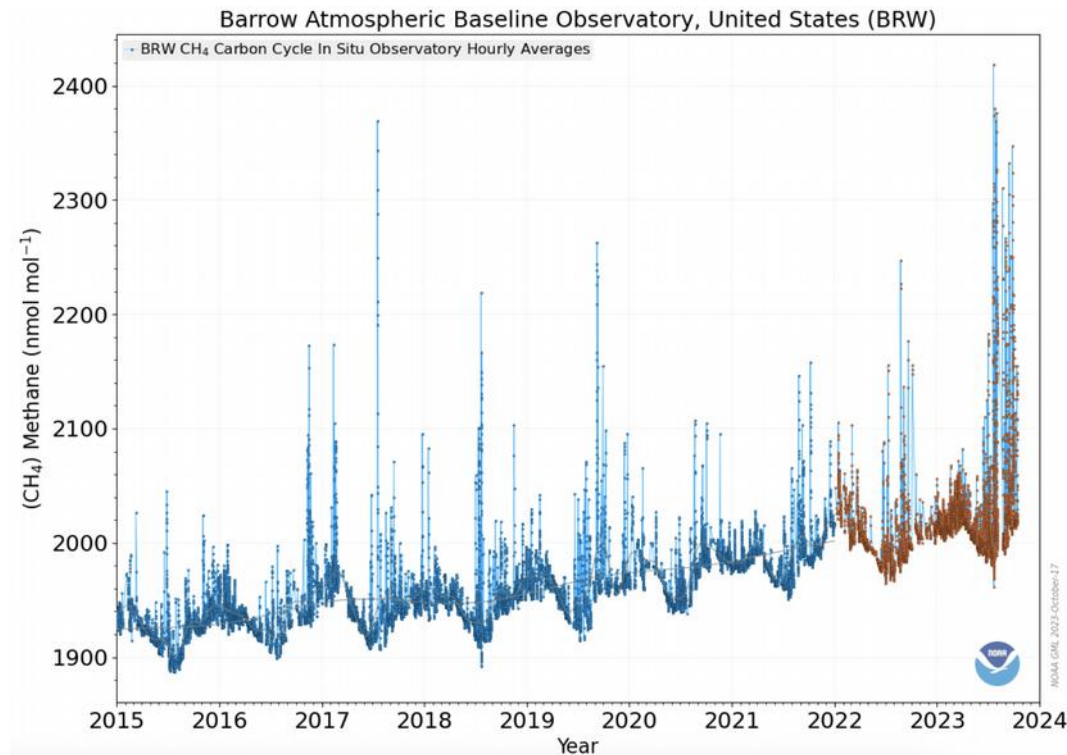
## **Onzekerheden:**

- ++ Snelle toename erosie
- + Methaan uit diepere gasreservoirs
- ++ Arctic Browning
- ± Klimaatmodellen: te simpele beschrijving permafrost landschap

# Nemen broeikasgassen uit permafrost meetbaar toe?

Schattingen emissie uit permafrost:

- niet goed te onderscheiden van andere bronnen
- daardoor toename op globale schaal niet goed bekend
- meetreeksen op de grond meestal te kort
- of laten voor methaan wel toename zien



# Is ontdooiende permafrost een kantelpunt?

## **Ontdooien permafrostbodem: geen kantelpunt**

Verlies permafrost nu:  $> 2.5$  x zo snel als aan einde ijstijd

Maar bevroren bodem keert snel terug bij afkoeling

## **Kantelpunt: Bodem/ecosystem-verstoring dooi ijsrijke permafrost**

op grote schaal

herstel bodemkoolstof duurt honderden jaren

## **Kantelpunt: Broeikasgasemissies**

veel onzekerheid

Arctic Browning: vermindering CO<sub>2</sub> opname

recente bosbranden: meer broeikasgas versnellen permafrost dooi

# Dank u voor de aandacht!

