

Bodemgezondheid van Nederlandse natuurgebieden

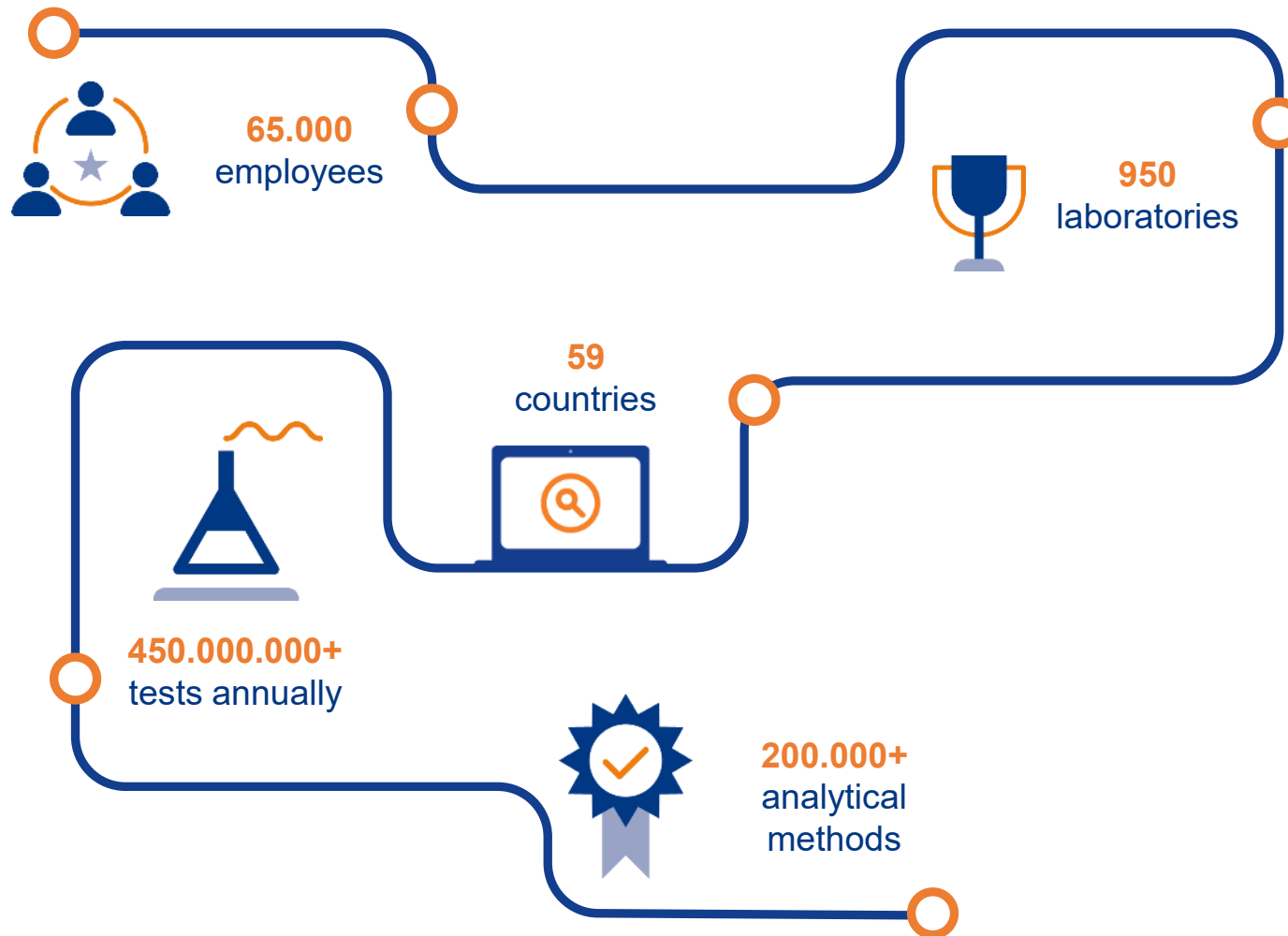
Context

Arjan Reijneveld

Karst Brolsma

Maurits Voogt





What do we do?

- Food & Feed Testing
- Environment Testing
- BioPharma Product Testing
- Clinical Diagnostics
- Agrosience contract research
- Consumer Product Testing
- Food Assurance
- Genomics & Forensics
- Clinical Trials
- Agro-testing

Wat wil de Nederlander ?

- Gelukkig zijn
- Gezond zijn
- Veilig zijn
- In welvaart leven
- Werk-privébalans





Europese Kaderrichtlijn Water

30 juli 2020 [Water](#)

In de Europese Kaderrichtlijn Water is het beleid voor de beoordeling van de kwaliteit van het oppervlakte- en grondwater in Europa vastgelegd. In de KRW is een methode ontwikkeld om de kwaliteit te beoordelen.

Vogel- en Habitatrichtlijn

De Vogelrichtlijn (1979) en de Habitatrichtlijn (1992) zijn door de Europese Unie opgesteld om de biologische biodiversiteit in Europa in stand te houden. In deze richtlijnen wordt aangegeven welke planten en dieren en hun natuurlijke habitats (leefgebieden) beschermd moeten worden door de lidstaten van de Europese Unie. De Vogelrichtlijn (VR) is gericht op in het wild levende vogelsoorten. De Habitatrichtlijn (HR) is gericht op dier- en plantensoorten. De richtlijnen zorgen voor gebieds- en soortenbescherming in Europa.

 Council of the EU | Press release | 29 September 2025 10:00

Council adopts new rules for healthier and more resilient European soils

The Council today formally adopted the soil monitoring directive, establishing the first-ever EU-wide framework for assessing and monitoring soils, with the overarching aspirational goal of achieving **healthy soils across Europe by 2050**.

This directive is a key step towards healthier and more resilient soils, which are vital for food security, clean water and the environment.





Gezonde
lucht

Gezond
voedsel

Voldoende
inkomen

Gezonde
biodiver-
siteit

Gezonde
bodem

Gezonde
natuur

Optimale
productie

Gezond
water

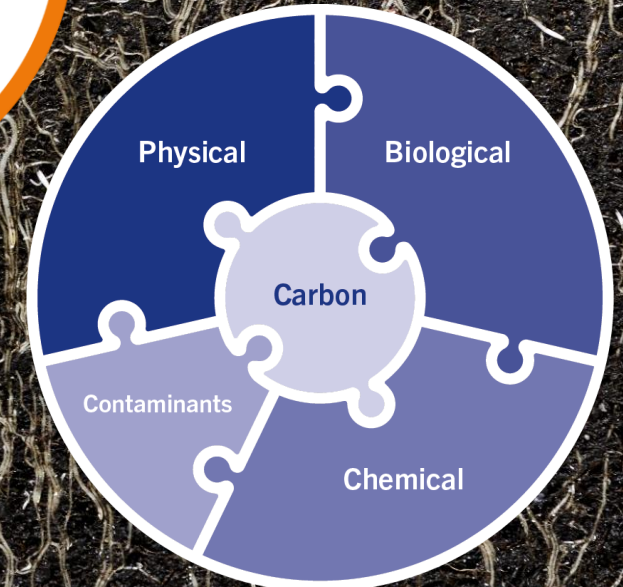
Bodemgezondheid van Nederlandse natuurgebieden

Inzichten uit de Bodemgezondheidsindicator

Arjan Reijneveld

Karst Brolsma

Maurits Voogt



A close-up photograph of a pair of hands, likely belonging to a person of African descent, holding a large, dark, and moist clump of soil. The soil is rich and crumbly, with some roots visible. The hands are positioned to hold the soil from the sides, with fingers visible. The background is a solid, deep blue color. A semi-transparent blue rectangular box is overlaid in the center of the image, containing the text 'Inhoudsopgave' in white.

Inhoudsopgave

- Aanleiding
- Materiaal & Methoden
- Resultaten & Discussie
- Conclusies & Aanbevelingen

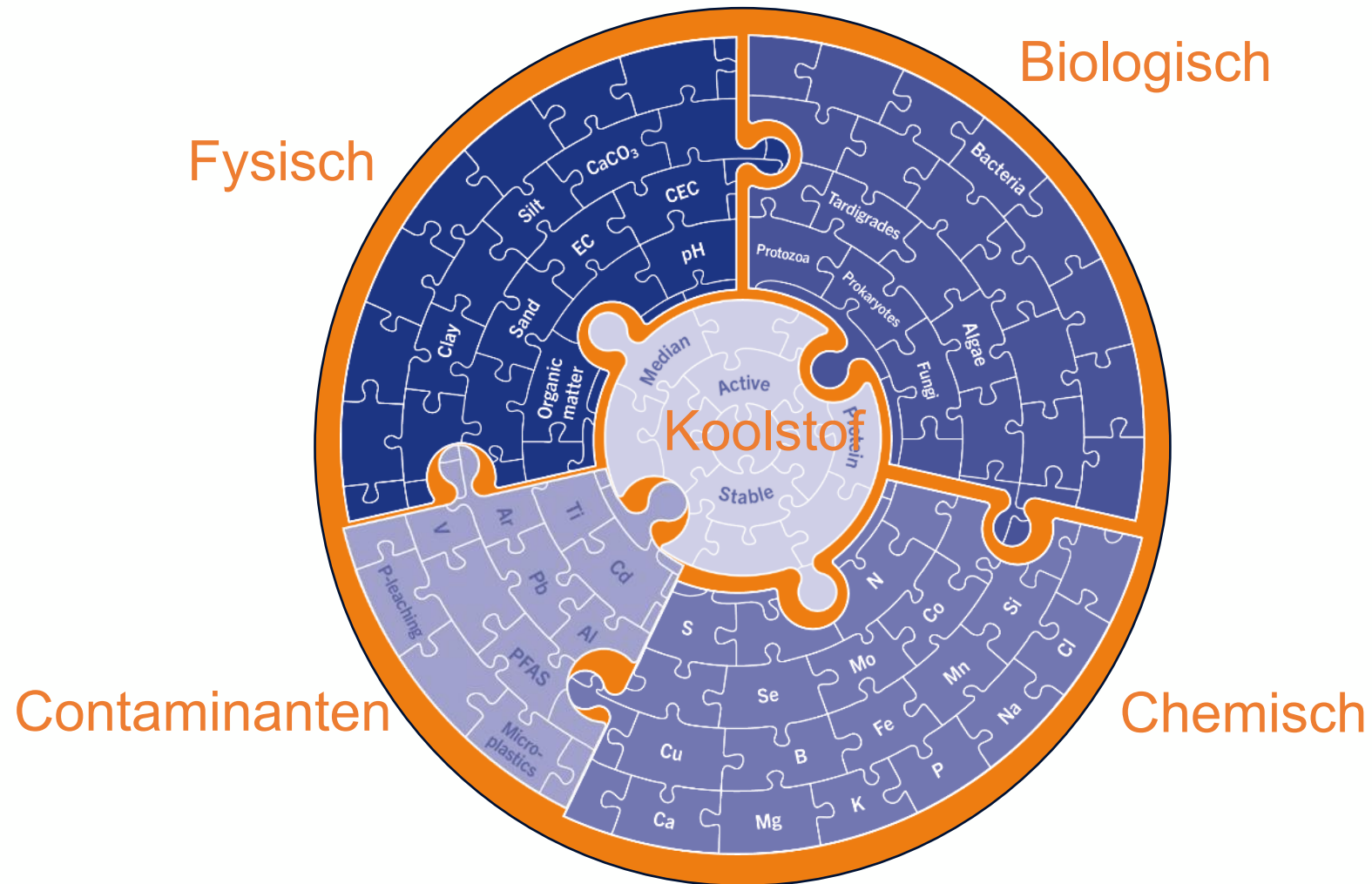


Aanleiding

- De gezondheid van bossen en natuur staat in Nederland sterk in de maatschappelijke belangstelling, met name in relatie tot stikstof (N).
- De bodem vormt het fundament van natuurlijke ecosystemen en bepaalt in belangrijke mate hun functioneren en veerkracht
- Daardoor beïnvloedt de bodem ook welke planten- en diersoorten zich kunnen handhaven en in welke mate biodiversiteit behouden blijft
- Systematisch bodemgezondheidsonderzoek in bos- en natuurgebieden is tot nu toe echter relatief beperkt toegepast.

Hoe gezond zijn Nederlandse natuurbodems eigenlijk?

Gezonde bodems zijn bodems die in een goede
fysische, biologische en chemische toestand verkeren
en daardoor ecosysteemdiensten
(zoals biodiversiteit, waterregulatie, koolstofopslag)
kunnen leveren die essentieel zijn voor mens en milieu



Gemeten via de Bodemgezondheidsindicator

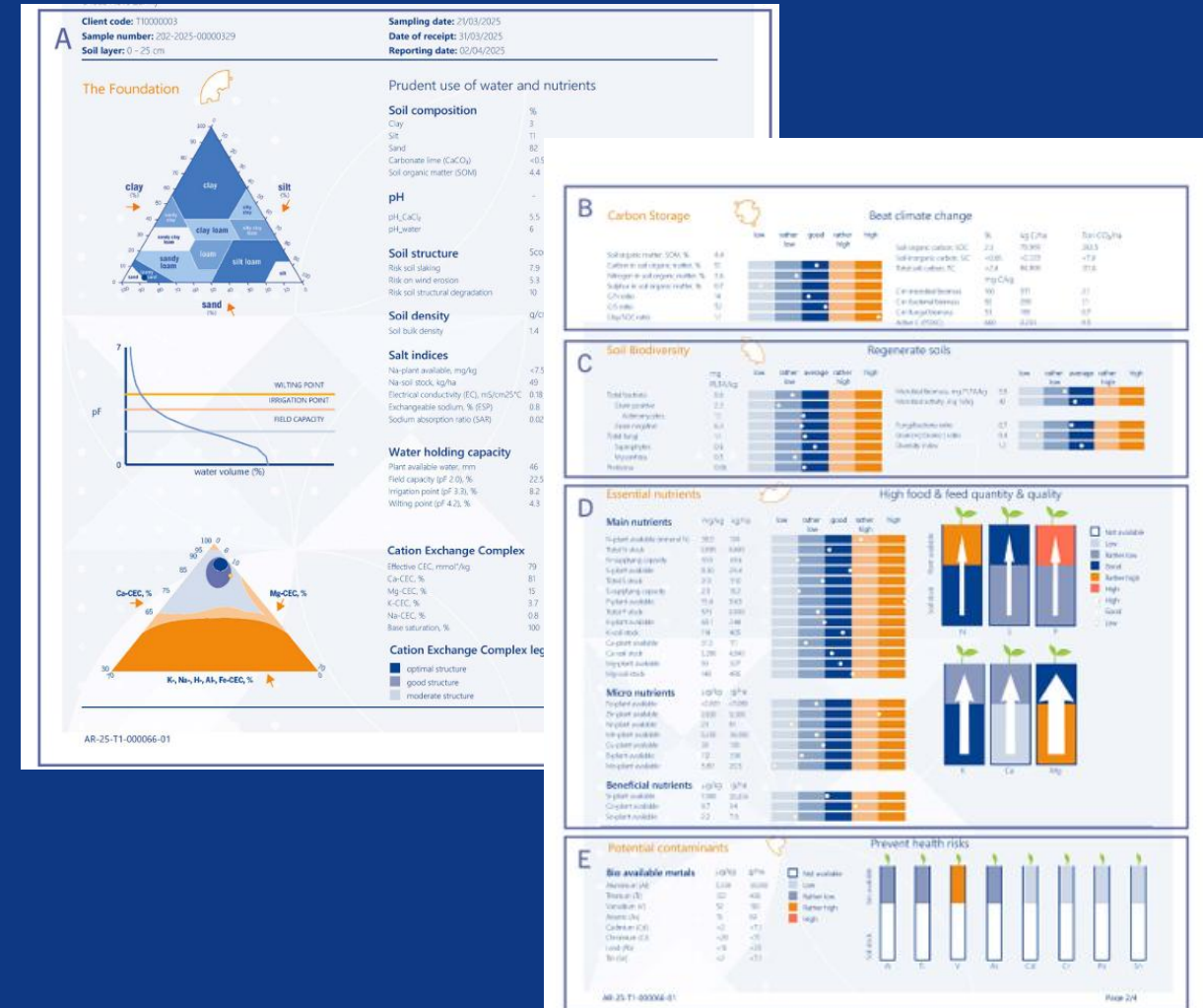
Reijneveld, J. A., & Oenema, O. (2025). Rapid Soil Tests for Assessing Soil Health. *Applied Sciences*, 15(15), 8669. <https://doi.org/10.3390/app15158669>

A pair of hands, with fingers slightly curled, holds a large, dark, and crumbly mass of soil. The soil appears moist and rich, with some small roots visible. The background is a solid, deep blue color. A semi-transparent blue rectangular box is centered over the soil, containing the text "Materiaal & Methoden" in white.

Materiaal & Methoden

Bodemgezondheidsindicator (BGI)

- Integrale beoordeling van bodemgezondheid
- Routinematig meer dan 35 bodemkengetallen
- Tier 1 & Tier 2 indicatoren (Soil Health Institute)
- Voorraad én actuele beschikbaarheid van nutriënten



• Praktijktoeepassing natuurgebieden (artikel in vakblad BODEM)	~100
• WUR-pilots habitattypen	~100
• CC-NL project 2018	~600
• CC-NL project 2024	~600
Totaal	~1500

Reijneveld, J. A., Brolsma, K. M., & Voogt, M. P. (2026). Bodemgezondheidsindicator toegepast in bos- en natuurgebieden: Integraal instrument voor beoordeling en monitoring van bodemgezondheid. *Bodem*, 36(3), 36-41.

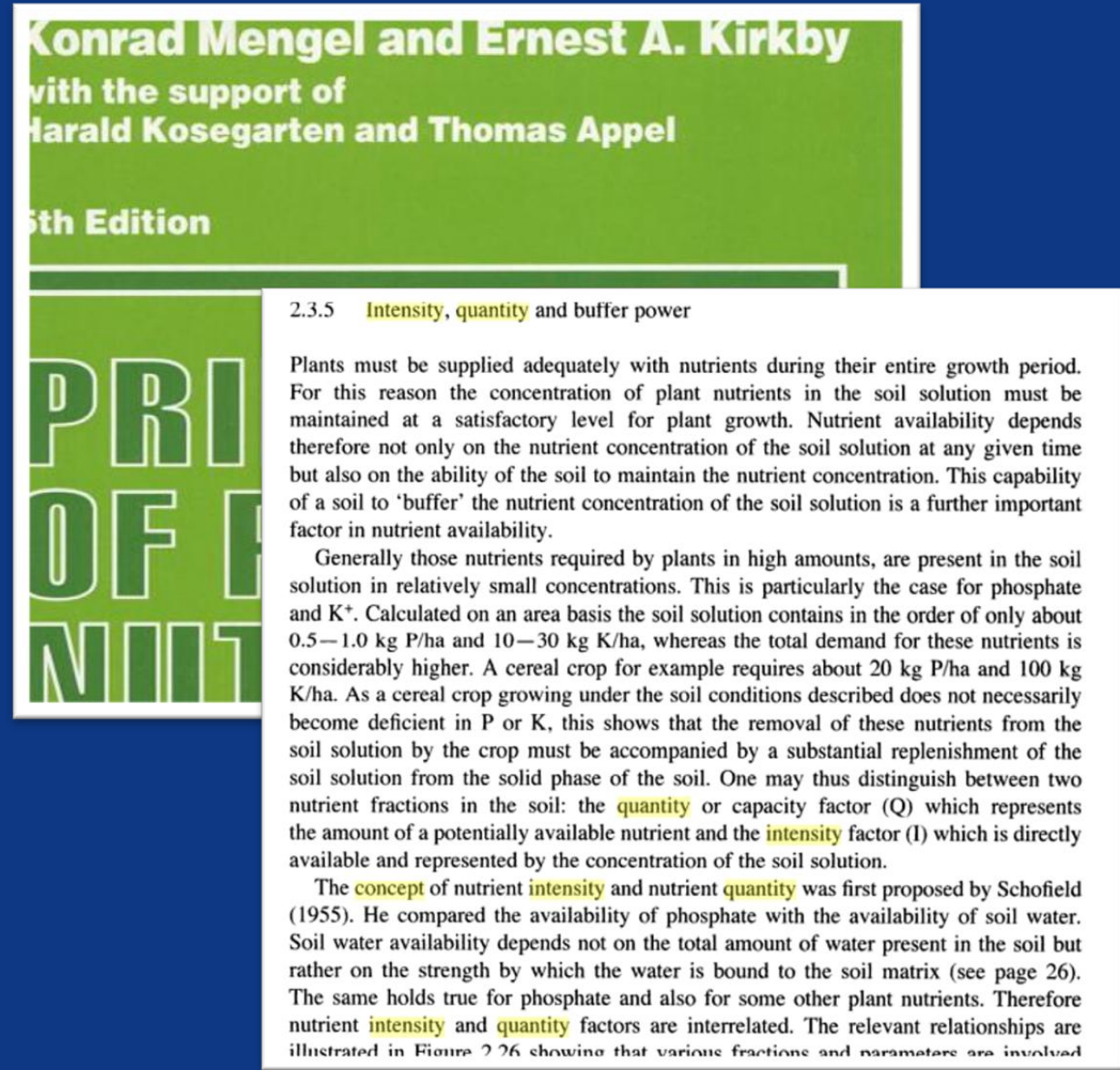
27 natuurgebieden (92 bodemmonsters) verspreid over 10 provincies, waaronder bossen (Veluwe, Utrechtse Heuvelrug, Drents-Friese Wold), duinen (Voornes Duin, Schoorlse Duinen), heiden (Vughtse Heide, Wierdenseveld), veengebieden (Korenburgerveen, Nieuwkoopse Plassen) en beekdal- en uiterwaardsystemen.

Woolderink, H. A. G., Assinck, F. B. T., Dekker, S., Dijk, P. G., Eigenraam, G., Gerritsen, P. A., De Groot, W. J. M., Plugers, R. M. L., Teuling, K., Schmidt, A. M., & Van Tol-Leenders, T. P. (2026). Bouwstenen voor bodemonitoring in habitattypen en natuurgebieden: Praktijkervaringen en aanbevelingen uit pilots (Rapport 3422). Wageningen Environmental Research.

Van den Elsen, E., Van Tol-Leenders, D., Teuling, K., Römken, P., De Haan, J., Korthals, G., & Reijneveld, A. (2020). De staat van de Nederlandse landbouwbodems in 2018: Op basis van beschikbare landsdekkende dataset (CC-NL) en bodem-indicatorenlijst (BLN) (Wageningen Environmental Research Rapport 3048). Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/537281>

- In de bodem fracties van nutriënten
- In de BGI volgen we zoveel mogelijk het systeem van beschikbaarheid, (semi) kwaniteit en buffering
- De beschikbaarheidsmeting sluit veelal beter aan bij de opname door vegetatie en (micro)-organismen dan kwantiteitsbepalingen
- Beter geschikt voor beoordeling van uitspoelingsrisico's
- De beschikbaarheidsbepaling is via één extractie voor macro-, micro-, nuttige elementen en (zware) metalen en daarmee sneller en milieuvriendelijker dan extracties met sterke zuren
- Internationaal toegepast en wetenschappelijk breed gevalideerd

e.g. Liu, W., Wang, S., Lin, P., Sun, H., Hou, J., Zuo, Q., & Huo, R. (2016). Response of CaCl_2 -extractable heavy metals, polychlorinated biphenyls, and microbial communities to biochar amendment in naturally contaminated soils. *Journal of Soils and Sediments*, 16(2), 476–485. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1218-z>



Konrad Mengel and Ernest A. Kirkby
with the support of
Harald Kosegarten and Thomas Appel
5th Edition

PRINCIPLES OF PLANT NUTRITION

2.3.5 Intensity, quantity and buffer power

Plants must be supplied adequately with nutrients during their entire growth period. For this reason the concentration of plant nutrients in the soil solution must be maintained at a satisfactory level for plant growth. Nutrient availability depends therefore not only on the nutrient concentration of the soil solution at any given time but also on the ability of the soil to maintain the nutrient concentration. This capability of a soil to 'buffer' the nutrient concentration of the soil solution is a further important factor in nutrient availability.

Generally those nutrients required by plants in high amounts, are present in the soil solution in relatively small concentrations. This is particularly the case for phosphate and K^+ . Calculated on an area basis the soil solution contains in the order of only about 0.5–1.0 kg P/ha and 10–30 kg K/ha, whereas the total demand for these nutrients is considerably higher. A cereal crop for example requires about 20 kg P/ha and 100 kg K/ha. As a cereal crop growing under the soil conditions described does not necessarily become deficient in P or K, this shows that the removal of these nutrients from the soil solution by the crop must be accompanied by a substantial replenishment of the soil solution from the solid phase of the soil. One may thus distinguish between two nutrient fractions in the soil: the **quantity** or capacity factor (Q) which represents the amount of a potentially available nutrient and the **intensity** factor (I) which is directly available and represented by the concentration of the soil solution.

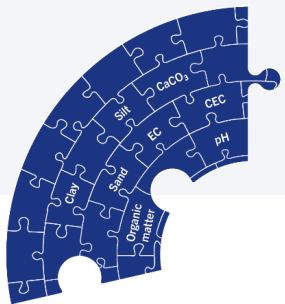
The **concept** of nutrient **intensity** and nutrient **quantity** was first proposed by Schofield (1955). He compared the availability of phosphate with the availability of soil water. Soil water availability depends not on the total amount of water present in the soil but rather on the strength by which the water is bound to the soil matrix (see page 26). The same holds true for phosphate and also for some other plant nutrients. Therefore nutrient **intensity** and **quantity** factors are interrelated. The relevant relationships are illustrated in Figure 2.26 showing that various fractions and parameters are involved



Data van groot belang; maar enige duiding noodzakelijk

A pair of hands, with fingers slightly curled, holds a large, dark, and crumbly mass of soil. The soil appears rich and moist, with some small roots visible. The background is a solid, dark blue color. A semi-transparent blue rectangular box is centered over the soil, containing the text "Resultaten & Discussie" in white.

Resultaten & Discussie



Het fundament: textuur, organische stof, kalk en water

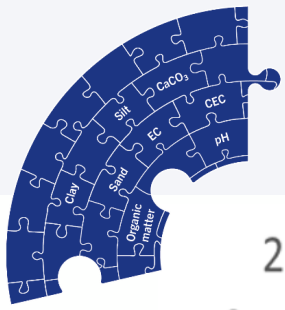
Textuur

- Zand (min 11 - max 99%) gem. 80%
- Silt (min 1 - max 36%) gem. 10%
- Klei (min 1 - max 27%) gem. 3%

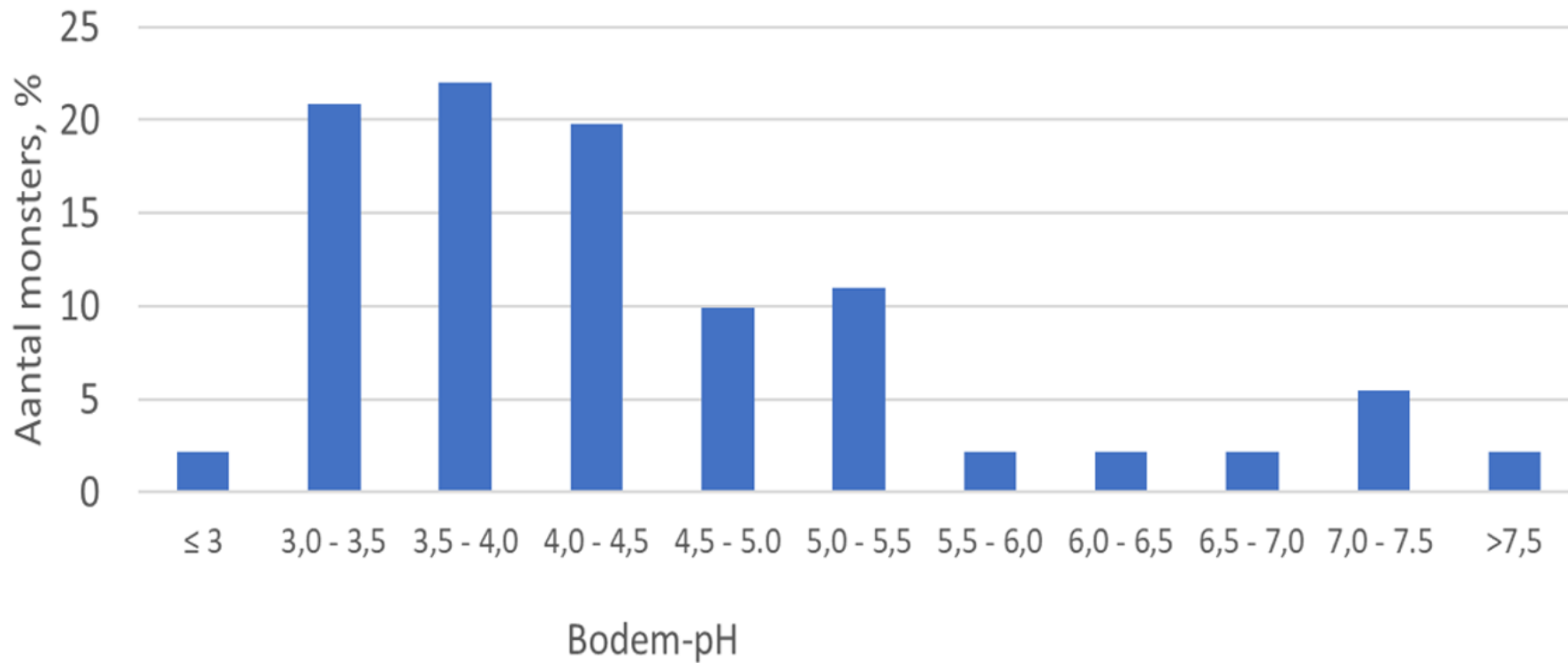
Organische stof zeer divers (0,4-74%) gem. 5.8% $\pm$ 9.9

CaCO₃ (kalk) (0,2-7%) gem. 1.0% $\pm$ 1.5

Grote verschillen in plantbeschikbaar water (20-230 mm)

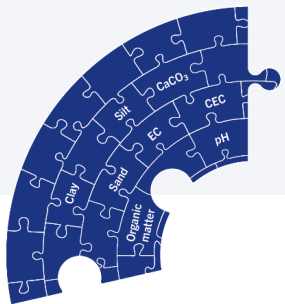


pH (zuurgraad)



- Nederland niet één homogeen ecosysteem
- Ook duidelijk kalk- en basenrijke systemen in de dataset
 - Voornes Duin
 - Kuinderbos
 - Sommige graslandlocaties

22% zeer zuur	pH < 3,5
21% zuur	pH 3,5–4,0
39% matig zuur	pH 4,0–5,5
17% neutraal tot kalkrijk	pH > 5,5



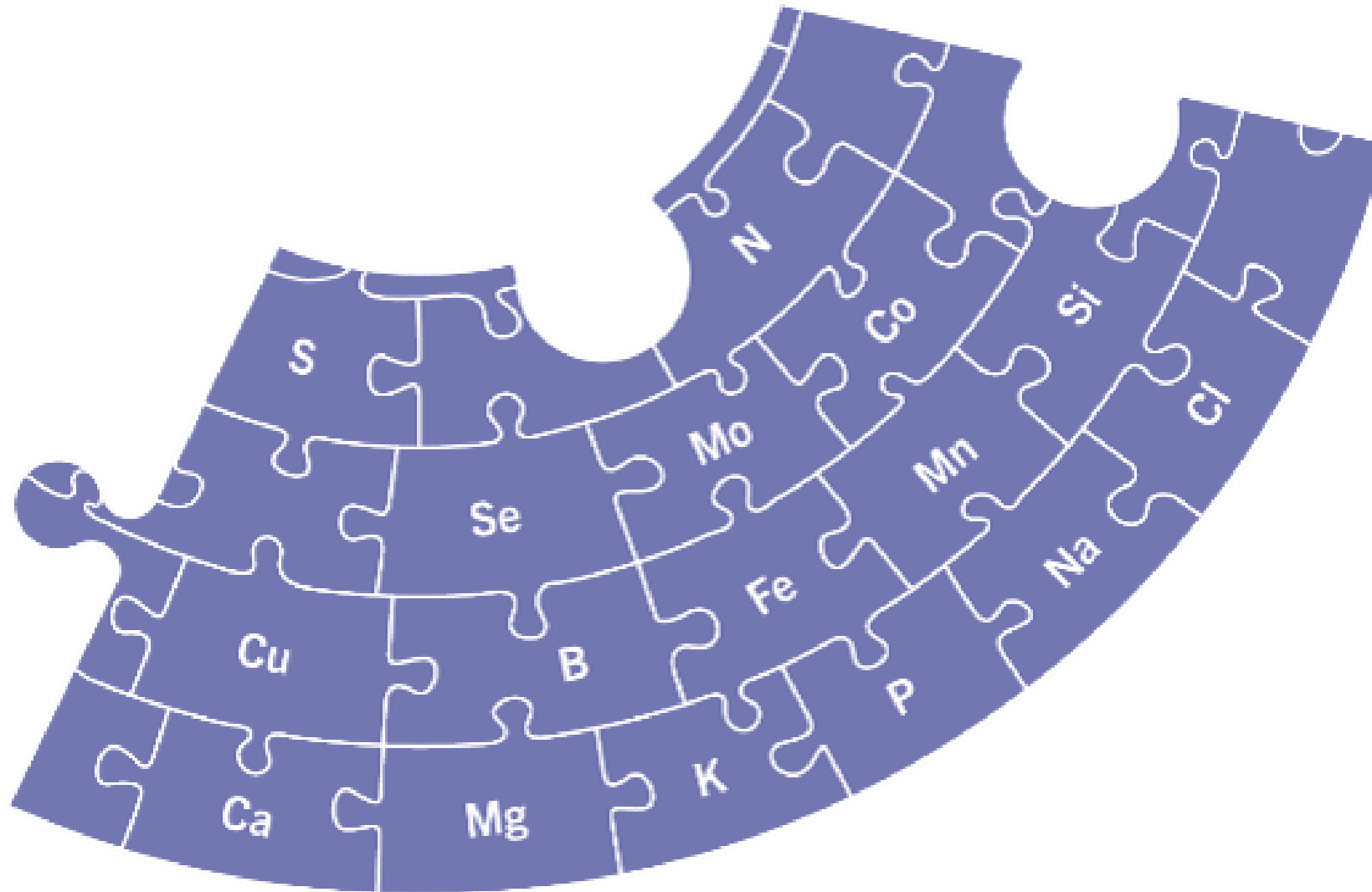
Bindend vermogen bodem (CEC)

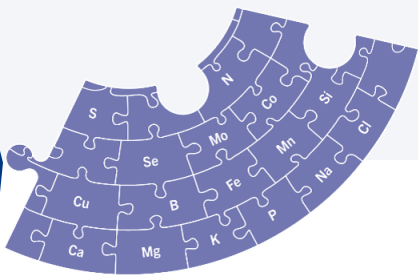
- CEC = klei-humus-complex
- CEC = de "voorraadkast" van de bodem: het vermogen om nutriënten vast te houden en ook weer af te geven aan vegetatie
- 50% van de locaties heeft een zeer lage CEC van minder dan 25 mmol(+)/kg
- Min 9, max 621, gem. 62 ± 106 mmol(+)/kg
- Lage pH verlaagt de effectieve CEC verder
- Nutriënten raken daardoor snel uitgeput of spoelen uit

Org stof, %	Klei, %	ECEC	pH	Ca-voorraad
4.8	2	41	3,2	30
4.8	2	55	5,2	37
4.8	2	65	6,2	51

Bij hogere pH is de voorraadkast
groter én beter gevuld met calcium

(1.5 ton Ca/ha)





- Historische depositie van stikstof (N) en zwavel (S) heeft bijgedragen aan bodemverzuring.
- Verzuring ontstaat vooral wanneer nitraat (NO_3^-) en sulfaat (SO_4^{2-}) uitspoelen en daarbij Ca, Mg en K meenemen. Hierdoor neemt de buffercapaciteit van de bodem af.
- De huidige bodemchemie weerspiegelt zowel de actuele situatie als decennia van historische depositie.
- Huidige verzuring van bosbodems wordt voor een aanzienlijk deel bepaald door de erfenis van historische zwaveldepositie
- Wij hebben geen depositie gemeten

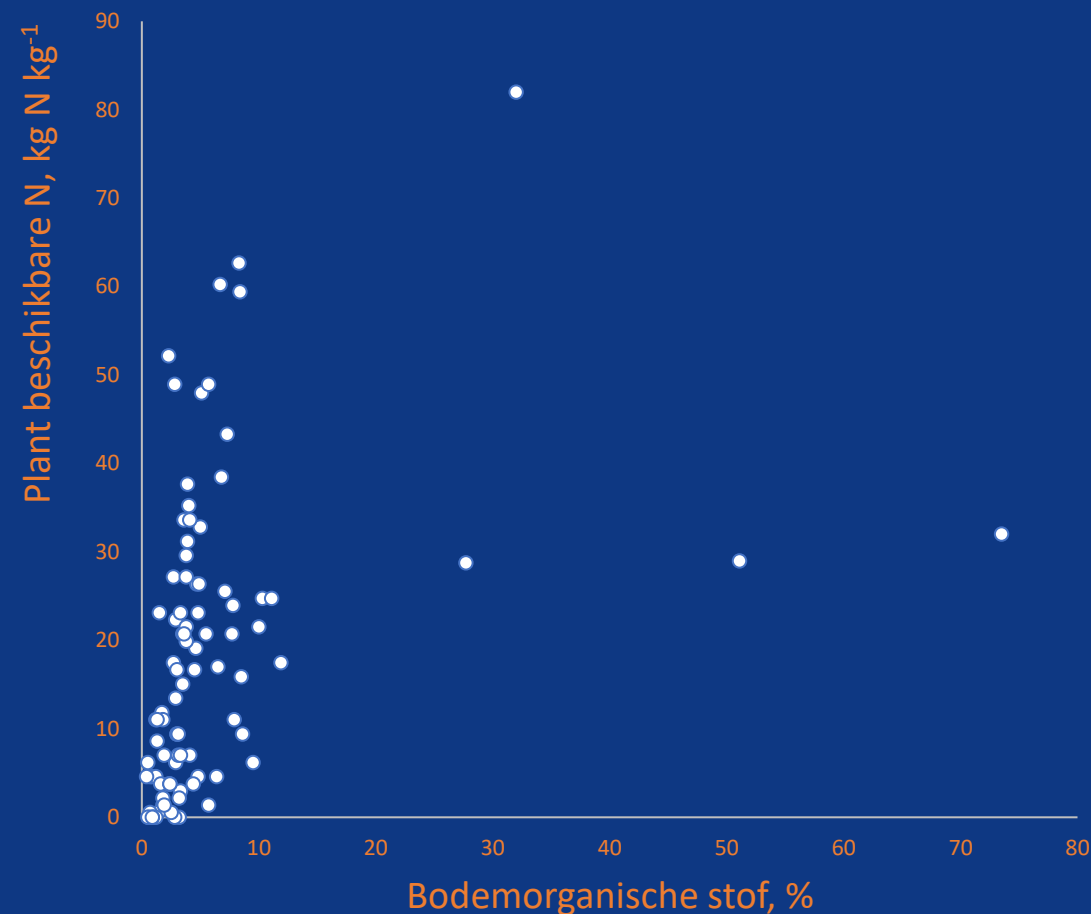
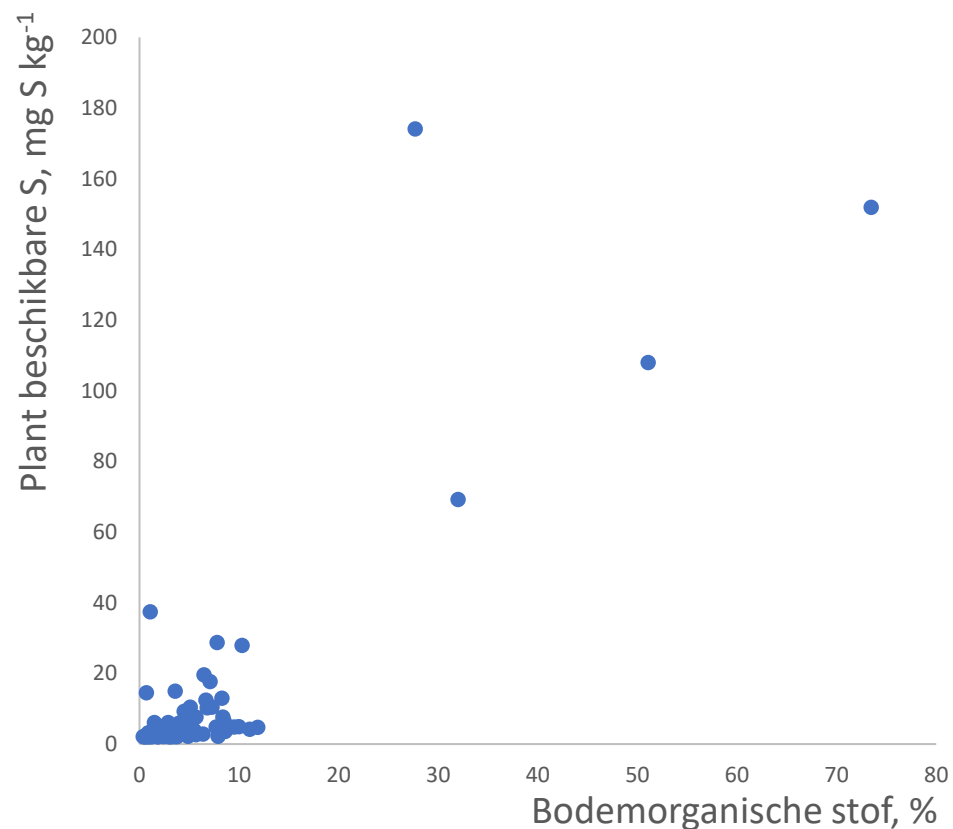
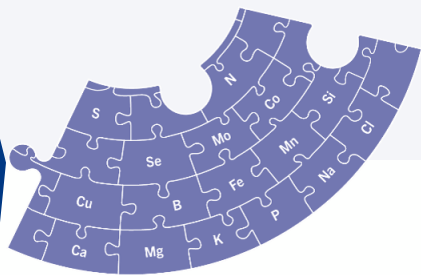
Wij vonden in de bodem (laag 0-30cm):

- N-totaal
 - 800–70.000 kg N/ha (mediaan ~4.000 kg N/ha)
 - vrijwel idem aan De Jong et al. (2024)
- Plant beschikbare (minerale) N
 - 1 – $18_{\pm 17}$ – 82 kg N/ha
- 60% van de analyses liggen de nitraatgehalten $\leq$ rapportagegrens
- S-totaal
 - 600–19.000 kg S/ha
- Plant beschikbare (minerale) S
 - 2 – $11_{\pm 27}$ – 174 mg S/kg

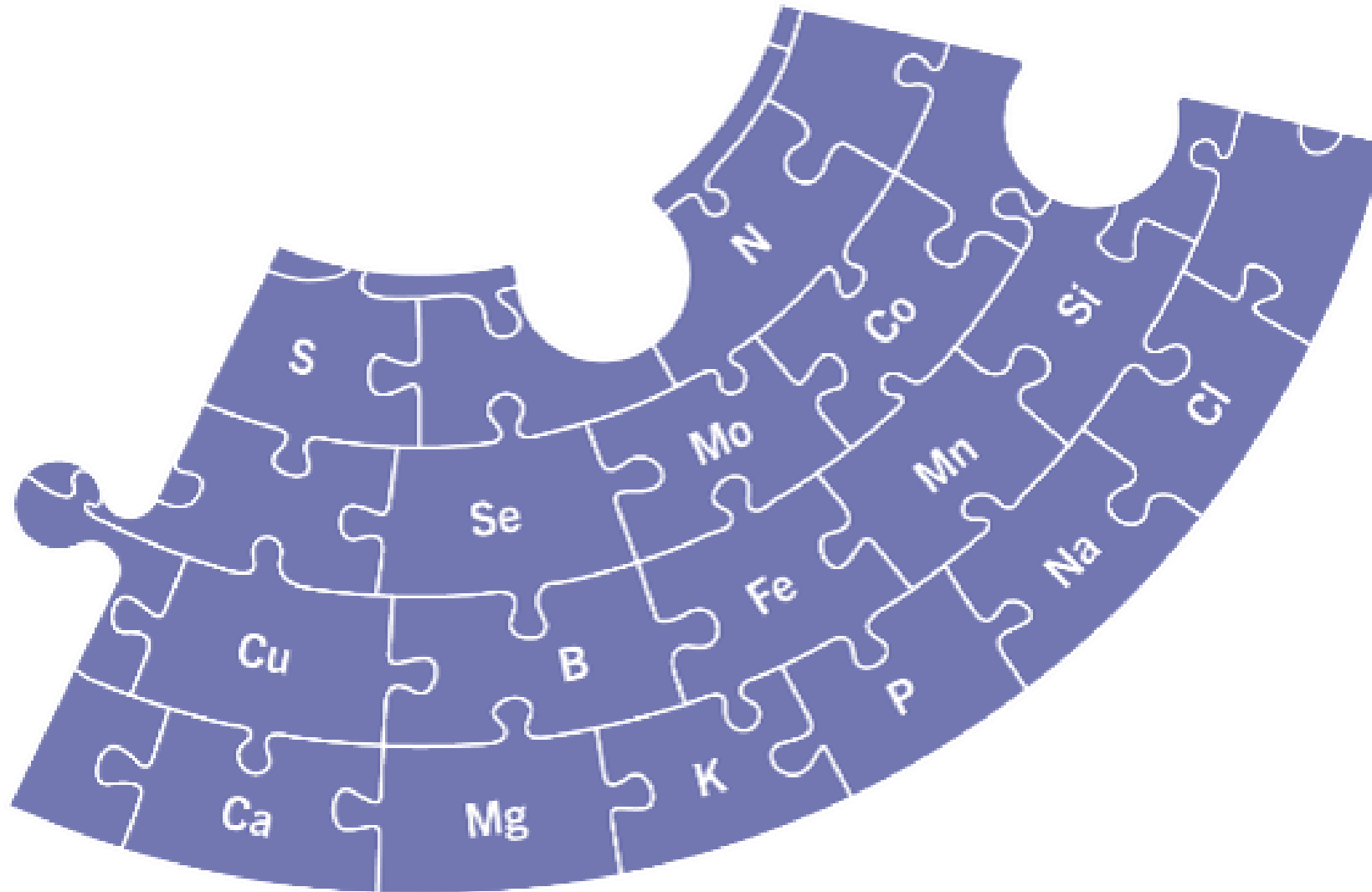
De Vries, W., & Breeuwsma, A. (1987). The relation between soil acidification and element cycling. *Water, Air, and Soil Pollution*, 35(3-4), 293-310

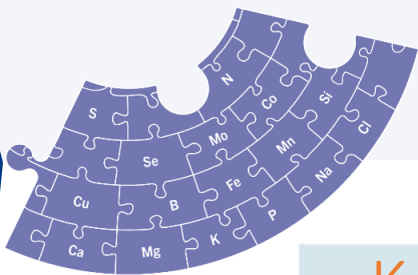
Vos, M. A. E. (2024). Impacts of harvesting practices on nutrient balances of forests under high nitrogen deposition (doctoraats-proefschrift). Wageningen University

De Jong, J. J., De Vries, W., Dijk, P. G., & Lerink, B. J. W. (2024). Veranderingen van voorraden koolstof, stikstof, fosfor, kalium, calcium, magnesium, ijzer en aluminium in bosbodems tussen 1990 en 2023 (Rapport 3362). Wageningen Environmental Research

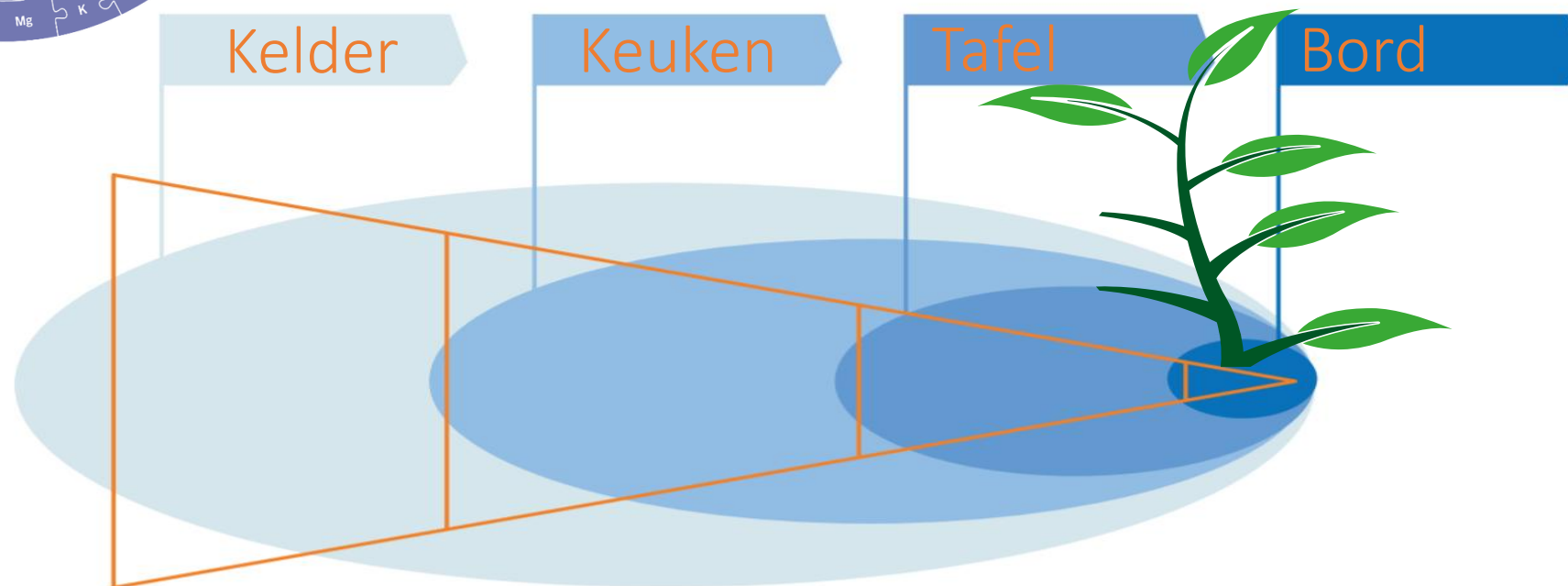


Beschikbaarheid wordt niet alleen bepaald door aanvoer, maar ook door mineralisatie van organische stof

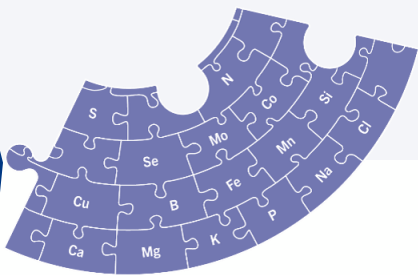




Fosfaatfracties en -metingen



P-total > **P-oxalate** > **P-Al** > P-Mehlich3 > P-Bray > P-AAEDTA (ammonium acetate + EDTA) > P-DL (calcium lactate) > P-CAL (calcium lactate/acetate) > **P-Olsen** > P paper strip > P-AAAc (acid ammonium acetate) > P-Morgen > P-H₂O > P-CO₂ (CO₂ saturated water) > **P-CaCl₂**



- P-Al: gemiddeld 9 ± 12 mg P_2O_5 /100 g
- 60% P-(semi)voorraad $\leq$ rapportagegrens
- P- $CaCl_2$ gemiddelde 0.6 ± 1 mg P /kg
- 75% P-beschikbaarheid $\leq$ rapportagegrens

50% heeft zowel geen fosfaat beschikbaarheid als geen (semi) voorraad

Is fosfaat belangrijk?

- Fosfaat is essentieel voor wortelontwikkeling (nutriënten- en wateropname)

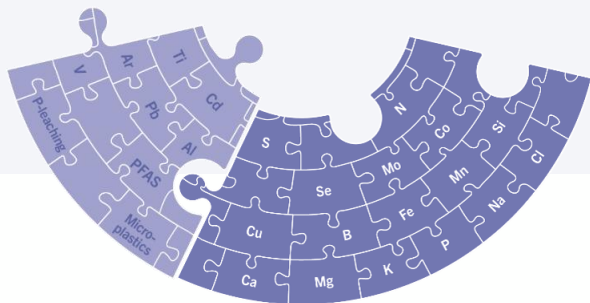
Nauwelijks beschikbare P – in de bodem?

- Minder P in bladeren, zaden, schimmels...
- Sleutelrol in de energiehuishouding (ATP) en opbouw van botten en schalen, en de erfelijke informatie (DNA en RNA)

Effecten kunnen doorwerken in hele voedselweb

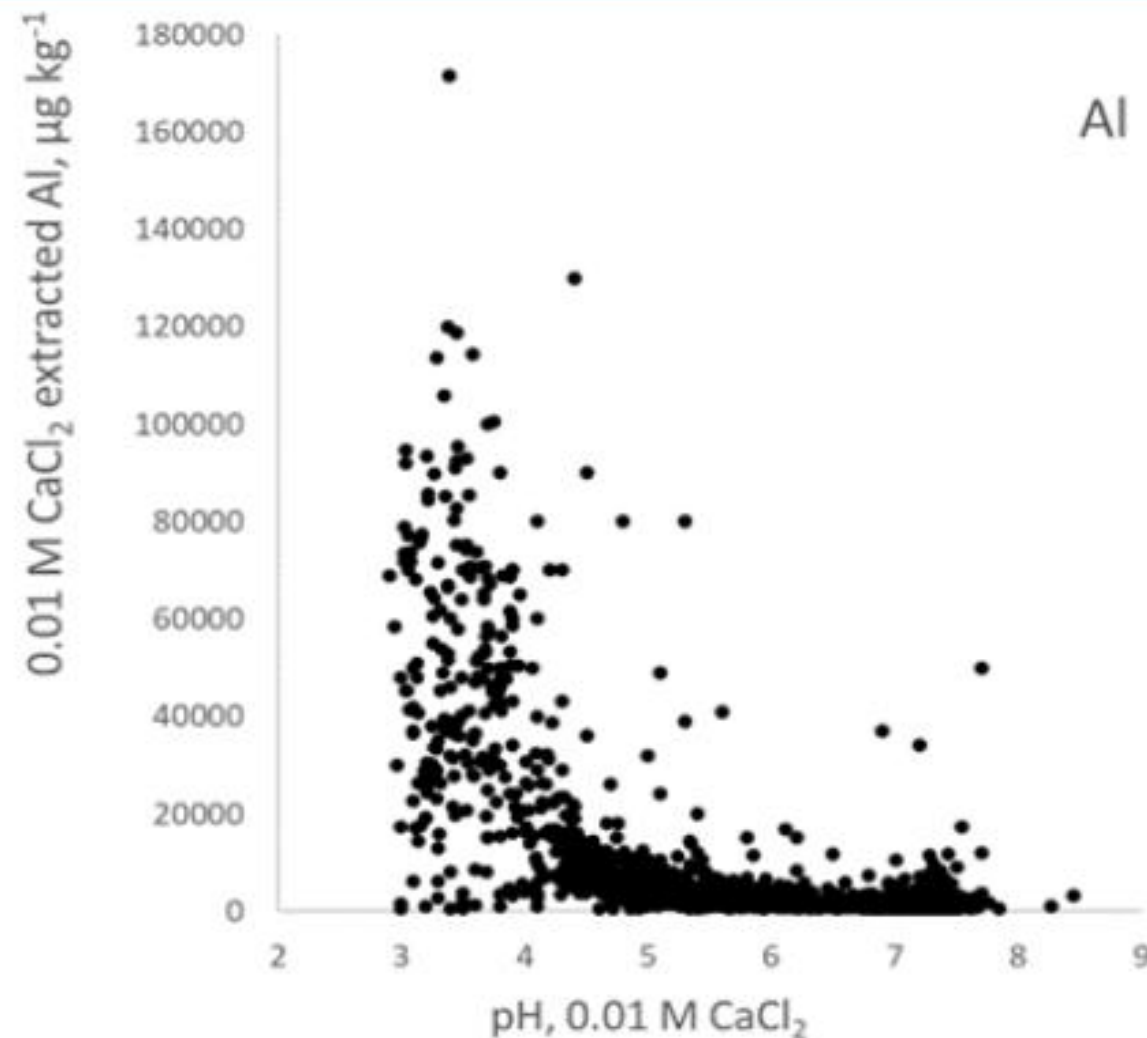
Likulunga, L. E., Leppälammi-Kujansuu, J., van der Wijk, M., & Vesterdal, L. (2022). Fine root biomass of European beech trees in different soil phosphorus availability and response to P addition. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 955327. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.955327>

Talkner, U., Matzner, E., & Borken, W. (2015). Phosphorus nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.) is decreasing in Europe. *Annals of Forest Science*, 72(9), 1183–1196. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0459-8>

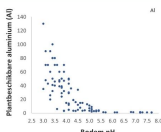


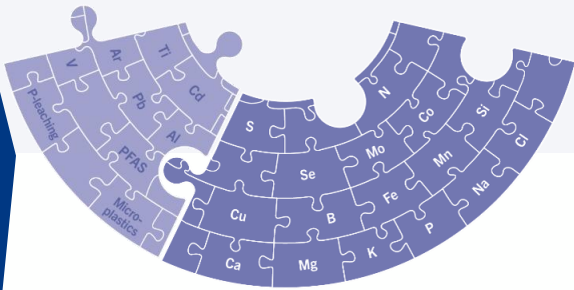
Fosfaat laag: redenen? (1/2)

- Bij een lage pH neemt de oplosbaarheid van diverse metaal(ionen) toe
- Dat geldt voor elementen als
 - Fe, Ni, Mn, Zn, Cu
 - Co
 - Al, Cd, Cr, Pb



Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants* (4th ed.). CRC Press





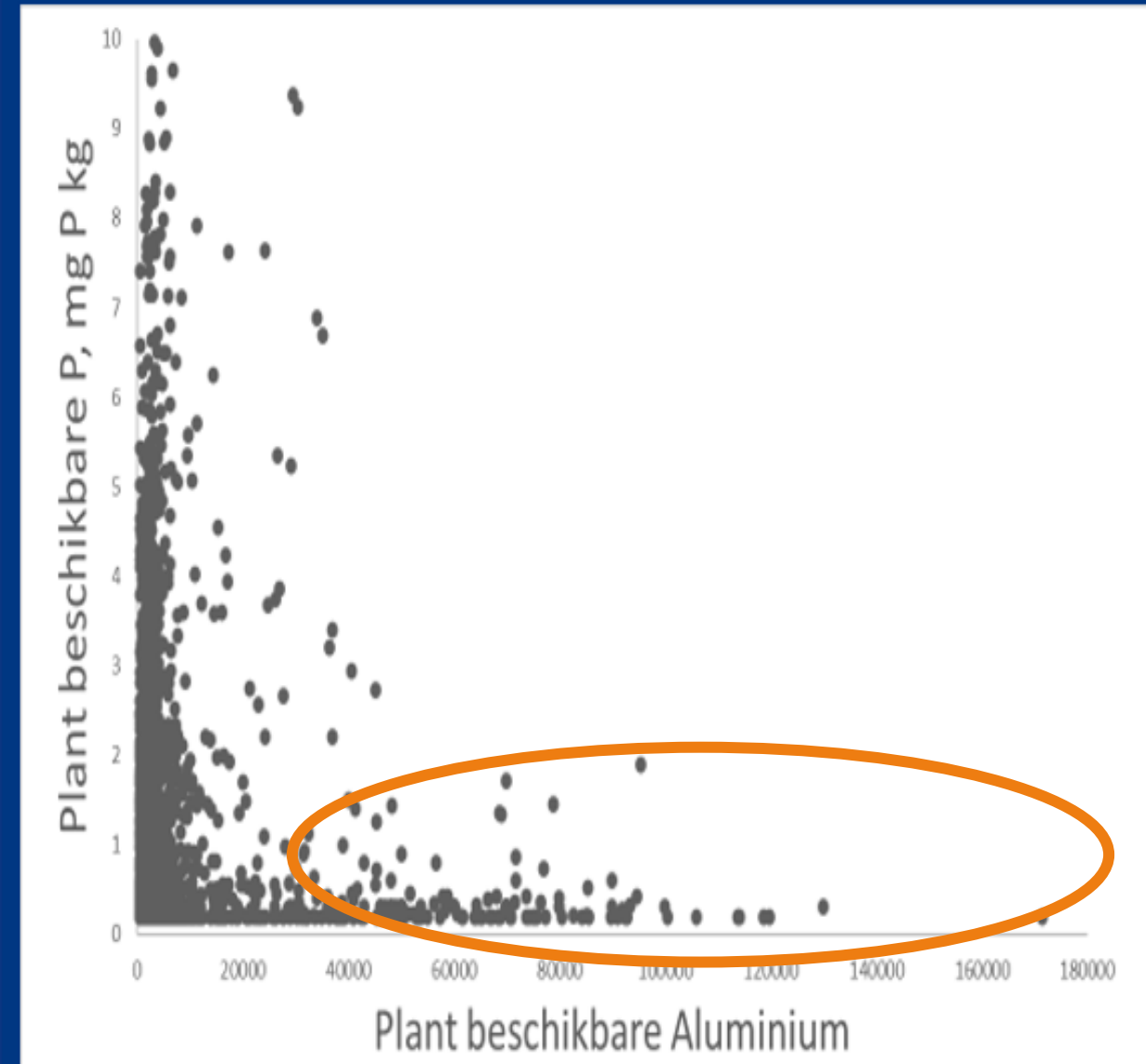
Fosfaat laag: redenen? (2/2)

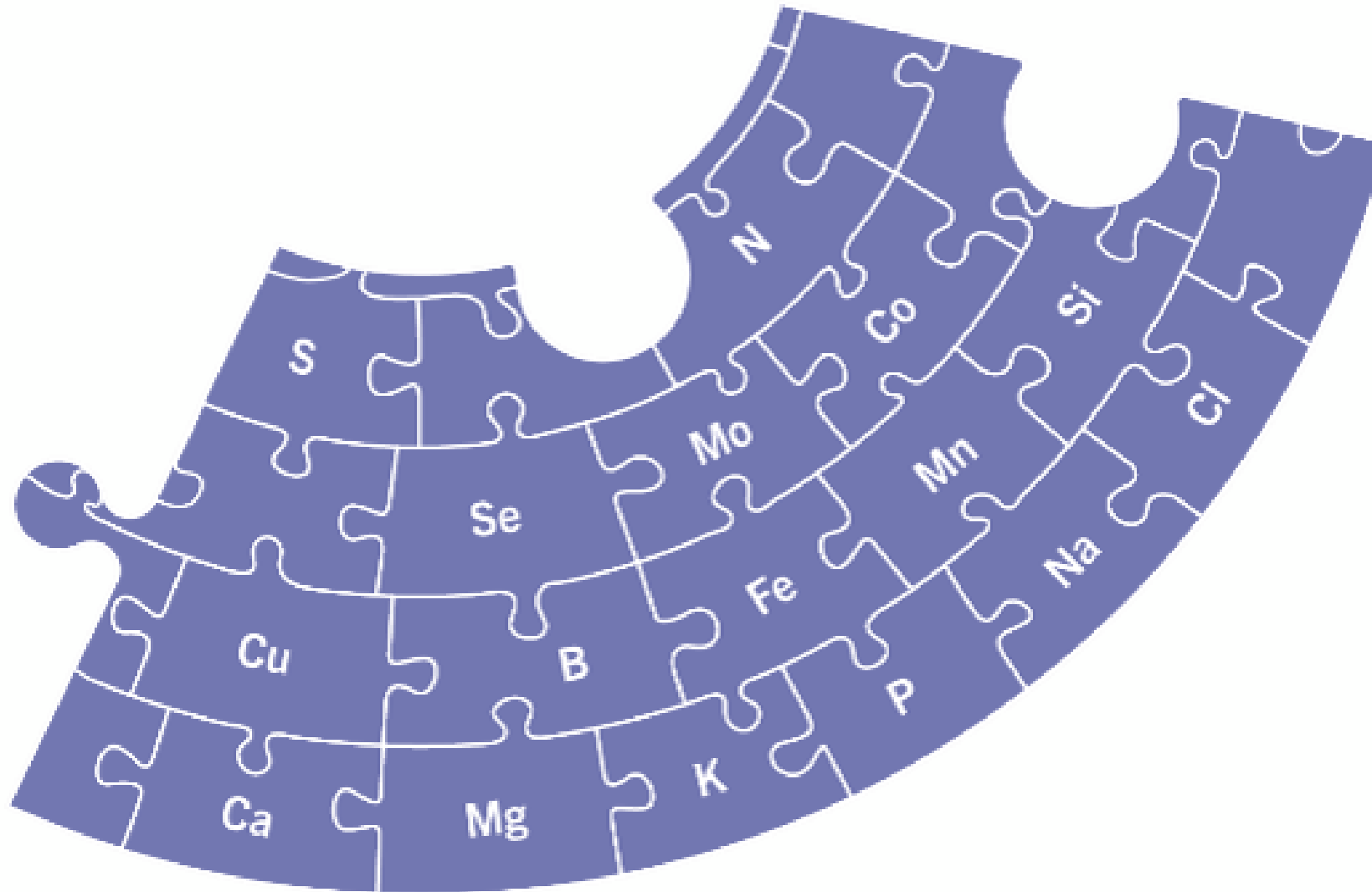
- P wordt gebonden door aluminium (P-fixatie); plant beschikbare P lager
- P wordt omgezet naar P-mineralen (varisciet ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$))
- Maar dus ook andere slecht oplosbare P-mineralen (Fe, etc)
- Actieve kalk slecht oplosbare Ca-fosfaten zoals apatiet en brushiet

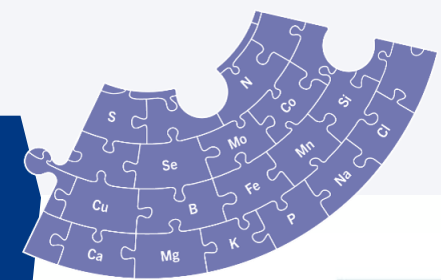
Hsu, P. H. (1976). Comparison of iron(III) and aluminum in precipitation of phosphate from solution. *Water Research*, 10(10), 903–907. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(76\)90026-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(76)90026-9) Penn, C. J., & Camberato, J. J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9(6), 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>

Andrunik, M., et al. (2020). Transformation of Pb, Cd, and Zn minerals using phosphates. *Minerals*, 10(4), 342. <https://doi.org/10.3390/min10040342>

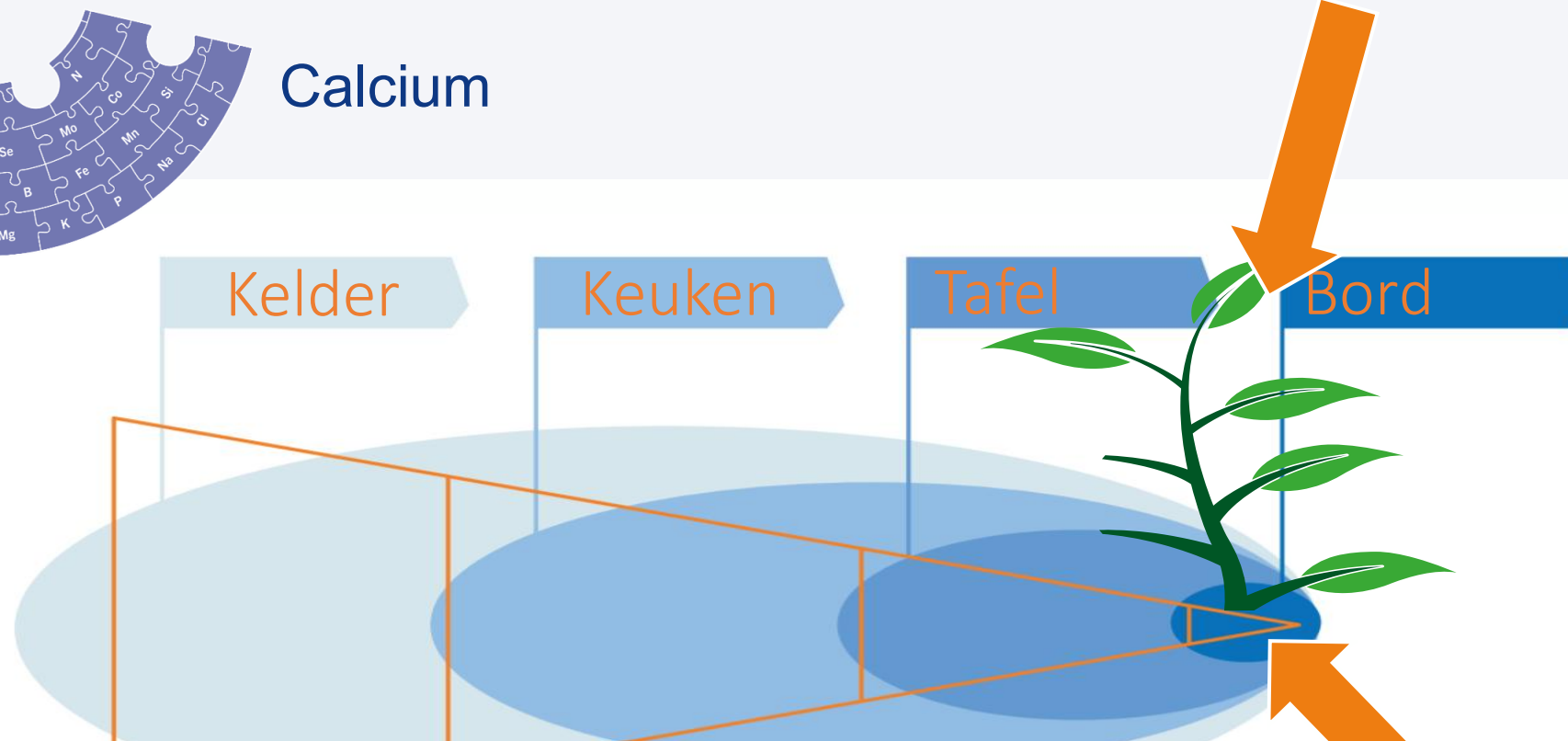
Von Wandruszka, R. (2006). Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochemical Transactions*, 7(1), 6.







Calcium



Kelder: slechts circa 20% van de locaties bevat meer dan 1% CaCO_3
minerale verwerking calcium uit veldspaat en mica zeer beperkt

Keuken: klein (door lage pH)
bezet met veel andere elementen dan calcium, mediaan Ca-CEC 9 mmol(+) kg^{-1}

Tafel/Bord 40% niets

Grondwater calciumrijk grondwater bijdrage veelal beperkt (zand)

Depositie levert maximaal circa 13 $\text{kg Ca ha}^{-1} \text{jaar}^{-1}$, maar ook daarbij wordt voor Nederlandse
Bosbodems een negatieve calciumbalans gerapporteerd.

Bolan, N. S., Adriano, D. C., & Curtin, D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in Agronomy*, 78, 215–272.

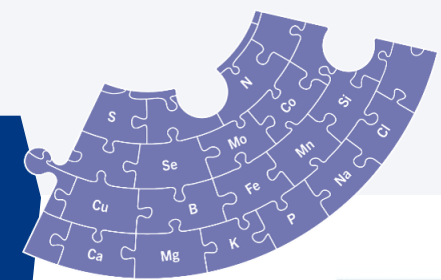
Dijkstra, F. A. (2003). Calcium mineralization in the forest floor and surface soil: tree species effects in northwestern Europe. *Forest Ecology and Management*

White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>

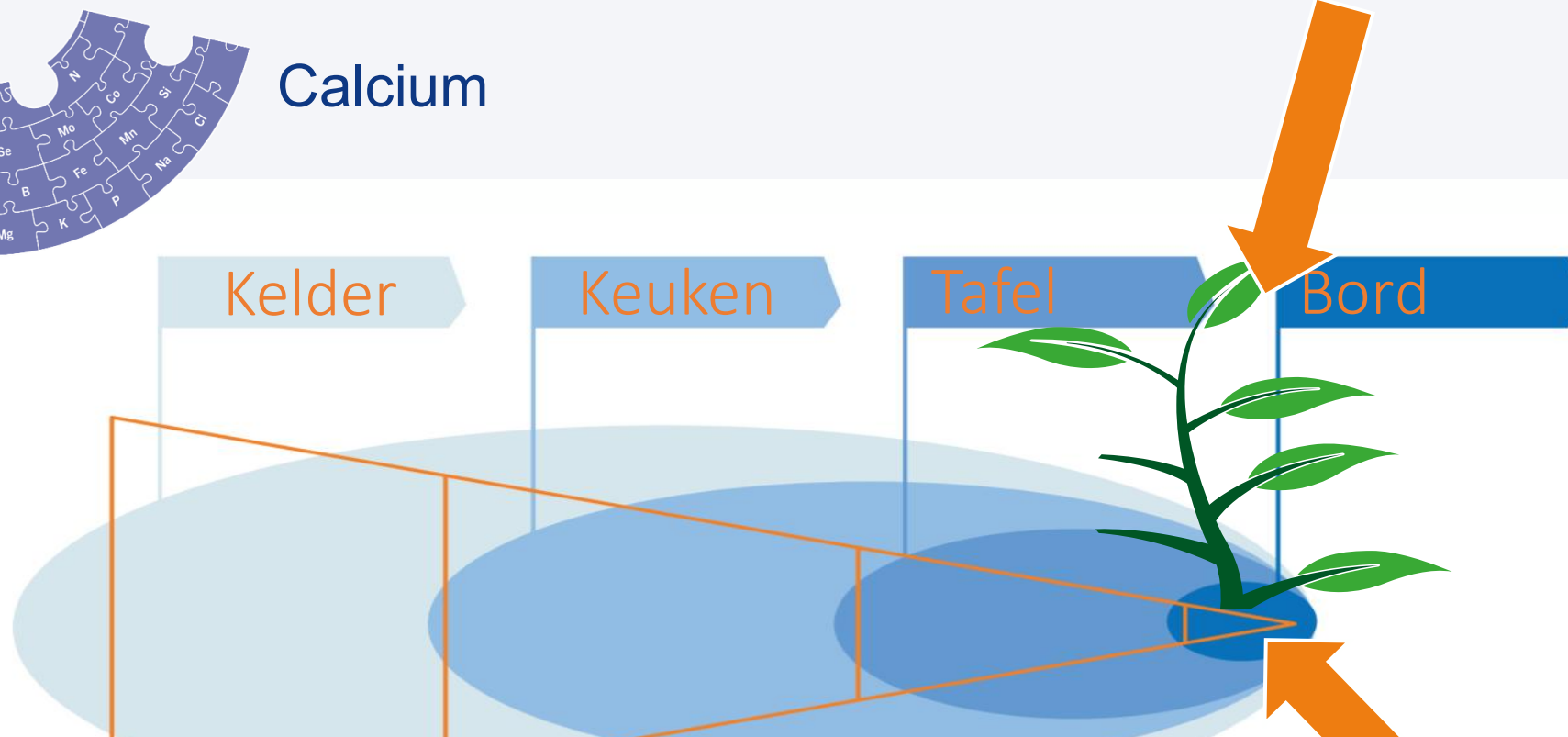
Likens, G. E., Driscoll, C. T., & Buso, D. C. (1998). Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest

244–246. <https://doi.org/10.1126/science.272.5272.244>

De Jong, J. J., De Vries, W., Dijk, P. G., & B. J. W. (2024). Veranderingen van koolstof, stikstof, fosfor, kalium, calcium, magnesium, ijzer en andere elementen in bosbodems tussen 1990 en 2023 (Rapportage). Wageningen Environmental Research



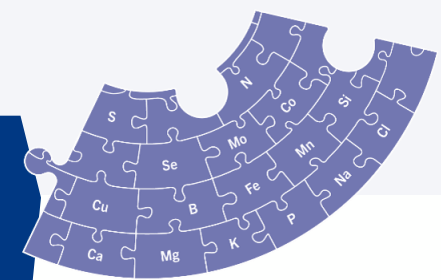
Calcium



Daarmee is de beschikbaarheid van calcium in dergelijke bodems sterk afhankelijk van beheermaatregelen

Groffman, P. M., Fisk, M. C., Driscoll, C. T., Likens, G. E., Fahey, T. J., & Eagar, C. (2006). Calcium additions and microbial nitrogen cycle processes in a northern hardwood forest. *Ecosystems*, 9(8), 1289–1305.

Graveland, J., & van der Wal, R. (1996). Decline in snail abundance due to soil acidification causes eggshell defects in forest passerines. *Oecologia*, 105(3), 351–360.



Calcium van belang?

Vegetatie

- Essentieel nutriënt
- Celwandstabiliteit en wortelontwikkeling
- Daarnaast heeft calcium een belangrijke ecologische functie in bos- en natuurgebieden: het beïnvloedt de samenstelling van de ondergroei en de diversiteit van mycorrhizale gemeenschappen

Fauna

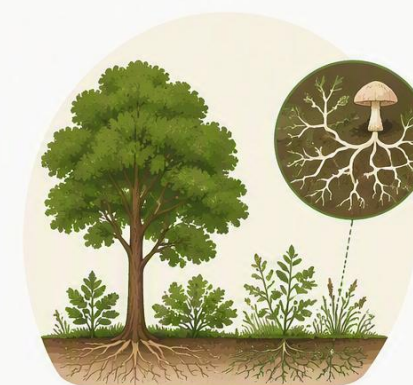
- Vooral van belang voor organismen met een kalkhoudend skelet of exoskelet, zoals slakken, insecten en vogels (bijvoorbeeld bij de eierschaalvorming)

Siepel, H., Bobbink, R., van de Riet, B., van den Burg, J., & Jongejans, E. (2019). Long-term effects of liming on soil physico chemical properties and microarthropod communities in a Scots pine forest on drift sand. *Biology and Fertility of Soils*, 55(6), 619–632. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01378-3>

van Straaten, O., Kulp, L., Martinson, G. O., Zederer, D. P., & Talkner, U. (2023). Forest liming in the face of climate change: The implications of restorative liming for soil organic carbon in mature German forests. *SOIL*, 9(1), 39–54

van Breemen, N., Mulder, J., & Driscoll, C. T. (1983). Acidification and alkalization of soils. *Plant and Soil*, 75(3), 283–308. <https://doi.org/10.1007/BF02369968>

Calcium verbindt bodemgezondheid en biodiversiteit



Ook voor het ecosysteem

Calcium beïnvloedt de ondergroei, mycorrhiza en de diversiteit van planten en bodemorganismen.



Ondersteunt mycorrhiza en bodemleven



Bevordert gezonde ondergroei en vegetatie



Essentieel voor insecten en andere ongewervelden

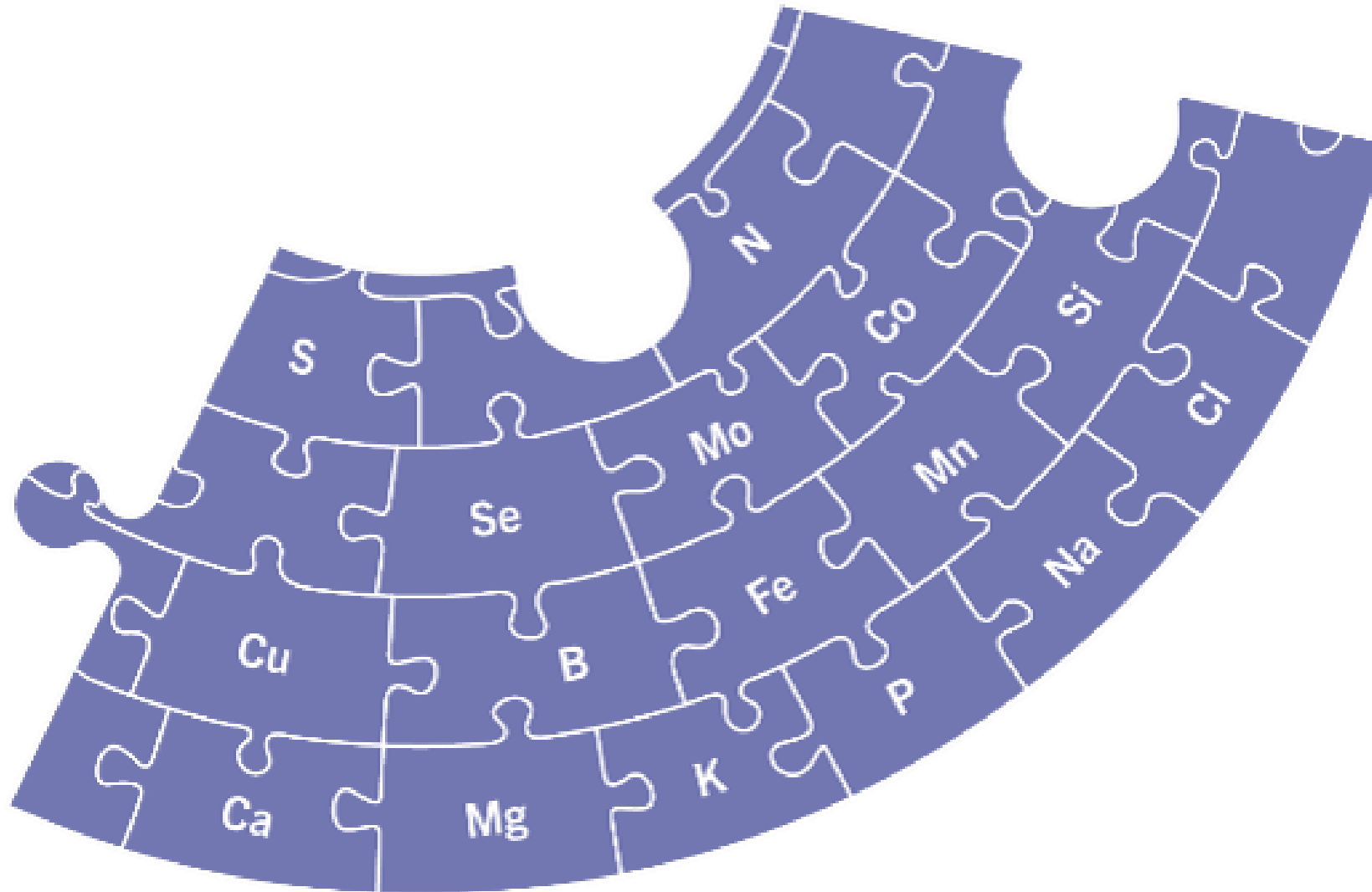


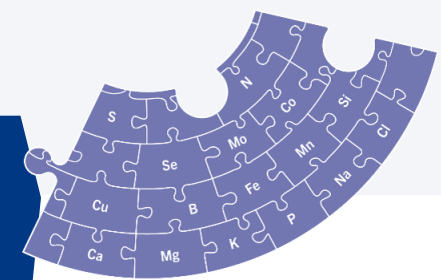
Belangrijk voor vogels en andere gewervelden



Tekorten aan calcium kunnen doorwerken in de gehele voedselketen.

- Bodemvruchtbaarheid
- Plantgroei
- Bodemleven
- Fauna
- Biodiversiteit





17 essentiële voedingsstoffen

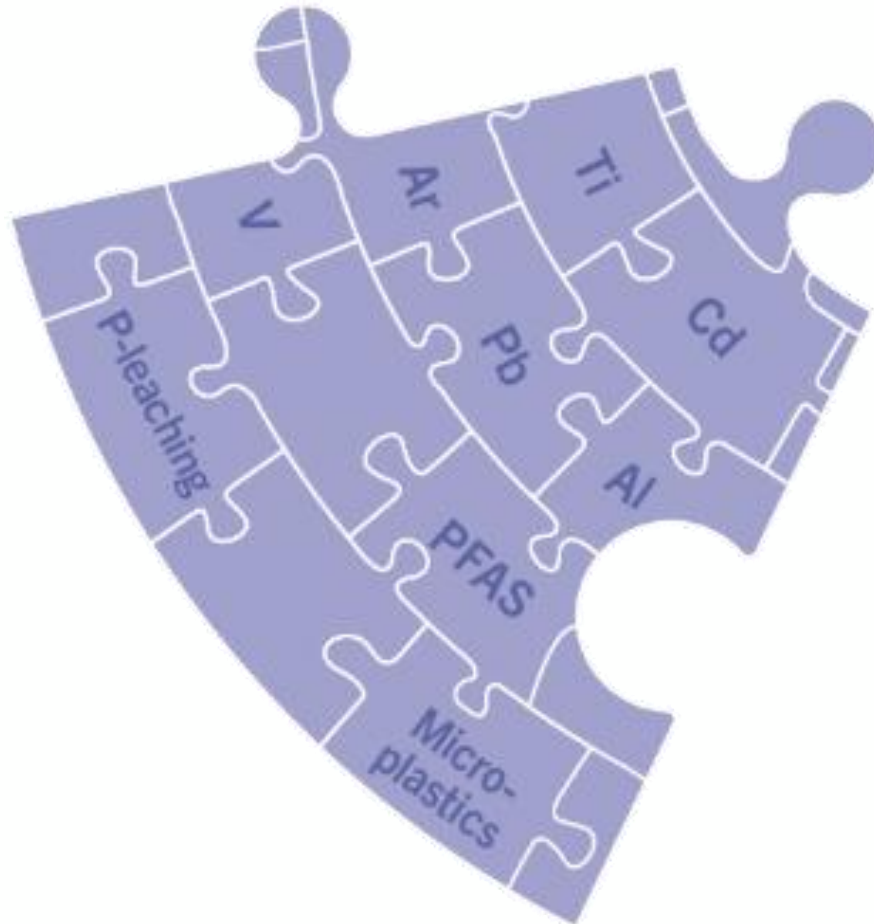
- Plant beschikbare Fe en Cu
 - 40% van de metingen onder rapportagegrens
- Borium
 - 75% van de metingen onder rapportagegrens
 - Een tekort kan leiden tot groeistoornissen en verminderde vitaliteit, vooral bij gevoelige loofbomen zoals berk en populier
- Molybdeen
 - 90% van de metingen onder rapportagegrens
 - Speelt een sleutelrol in de stikstofkringloop en stikstofbenutting; een lage beschikbaarheid kan daardoor ook de benutting van aanwezige stikstof beperken.

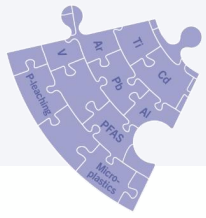
Bodemgezondheid gaat niet alleen over stikstof, fosfaat en calcium

Ook (sporen)elementen kunnen ecosystemen beperken

Rousk, K., Degboe, J., Michelsen, A., Bradley, R., Bellenger, J. P., & Rinnan, R. (2017). Molybdenum and phosphorus limitation of moss-associated nitrogen fixation in boreal ecosystems. *New Phytologist*, 214(1), 97–107.
<https://doi.org/10.1111/nph.14331>

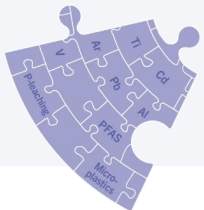
Dell, B., & Huang, L. (1997). Physiological response of plants to low boron. *Plant and Soil*, 193(1), 103–120





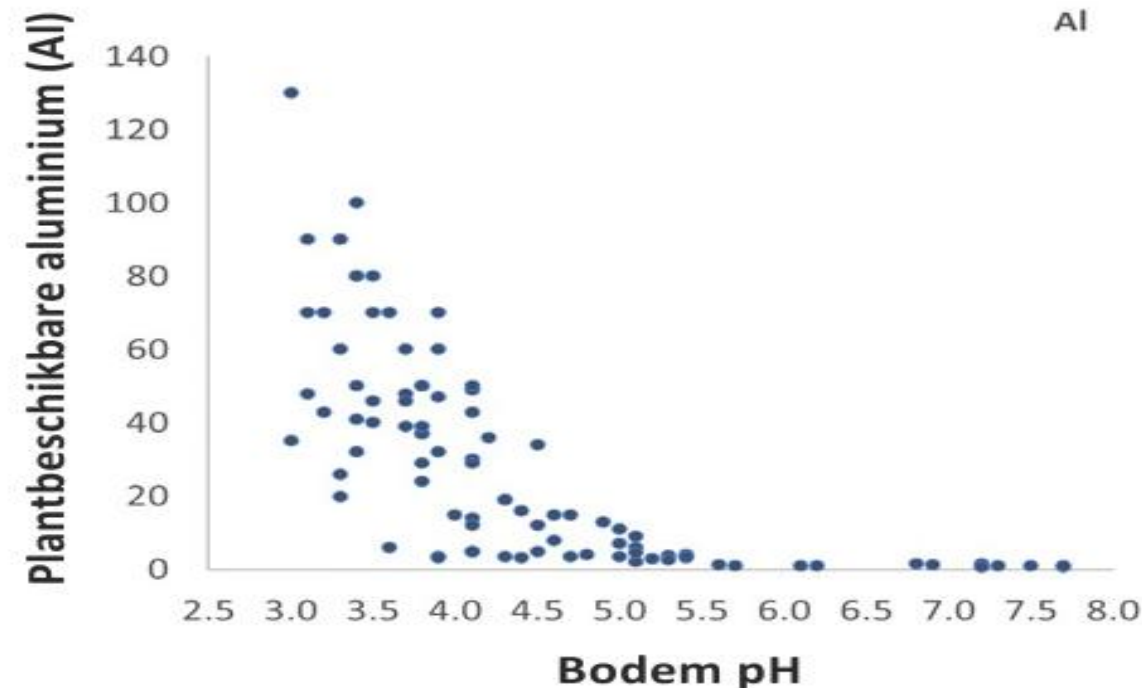
(zware) metalen

- Plant beschikbare elementen gemeten (bio available)
- Cadmium (Cd), chroom (Cr), lood (Pb), tin (Sn), titanium (Ti), vanadium (V) en arseen (As) liggen meestal ruim onder niveaus waarbij ecologische effecten worden verwacht
- Geen aanwijzingen voor grootschalige toxiciteit van deze elementen in de onderzochte bos- en natuurgronden



Aluminium

- We kijken vaak naar stikstof, fosfaat en calcium, maar uiteindelijk kan de grootste biologische impact van verzuring wel eens via aluminium verlopen
- Aluminium bindt fosfaat, maar kan bij lage pH ook toxisch worden
- Hoge concentraties beschikbaar aluminium worden in de literatuur in verband gebracht met negatieve effecten op gevoelige boomsoorten, mycorrhizale schimmels en microbiële gemeenschappen
- Verhoogde beschikbaarheid van aluminium wordt geassocieerd met wortelremming, afnemende microbiële activiteit en verminderde bosvitaliteit
- We vonden:
 - Mediaan: 19 mg/kg
 - Maximum: 130 mg/kg
 - Circa 70% van de monsters > 5 mg/kg (Kunita et al.,)



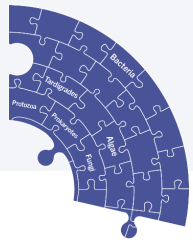
Tolpeshta, I. I. (2010). Possible sources and compounds of aluminum in calcium chloride extract soil solutions in peat podzolic-gleyed Moscow <https://doi.org/10.3103/S0147687410030026> University

Pavlu, L., Drábek, O., Stejskalová, Š., Tejnecký, V., Hradilová, M., Nikodem, A., & Borůvka, L. (2018). Distribution of aluminium fractions in acid forest soils: influence of vegetation changes. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 11(6), 721–727. <https://doi.org/10.3832/for2498-011>

Kunita, T., Isomura, I., Sumi, H., Park, H.-D., Toda, H., Otsuka, S., Nagaoka, K., & Senoo, K. (2016). Aluminum and acidity suppress microbial activity and biomass in acidic forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 97, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.019>

Balík, J., Kulháněk, M., Černý, J., Sedlář, O., & Suran, P. (2019). Impact of organic and mineral fertilising on aluminium mobility and extractability in two temperate Cambisols. *Plant, Soil and Environment*, 65(12), 581–587





Bodemleven

- Meer organische stof = meestal meer bodemleven
- basis voor nutriëntenkringloop, koolstofopslag en veerkracht
- In bos- en natuurgronden wordt doorgaans een schimmel/bacterie-ratio tussen 0,1 en 2 gerapporteerd
- Hogere waarden ($\geq 1-2$) komen vooral voor in naaldboutbossen of zure, nutriëntarme bodems
- Nog extremere waarden kunnen zich voordoen bij langdurige stikstof- of fosforbeperkingen

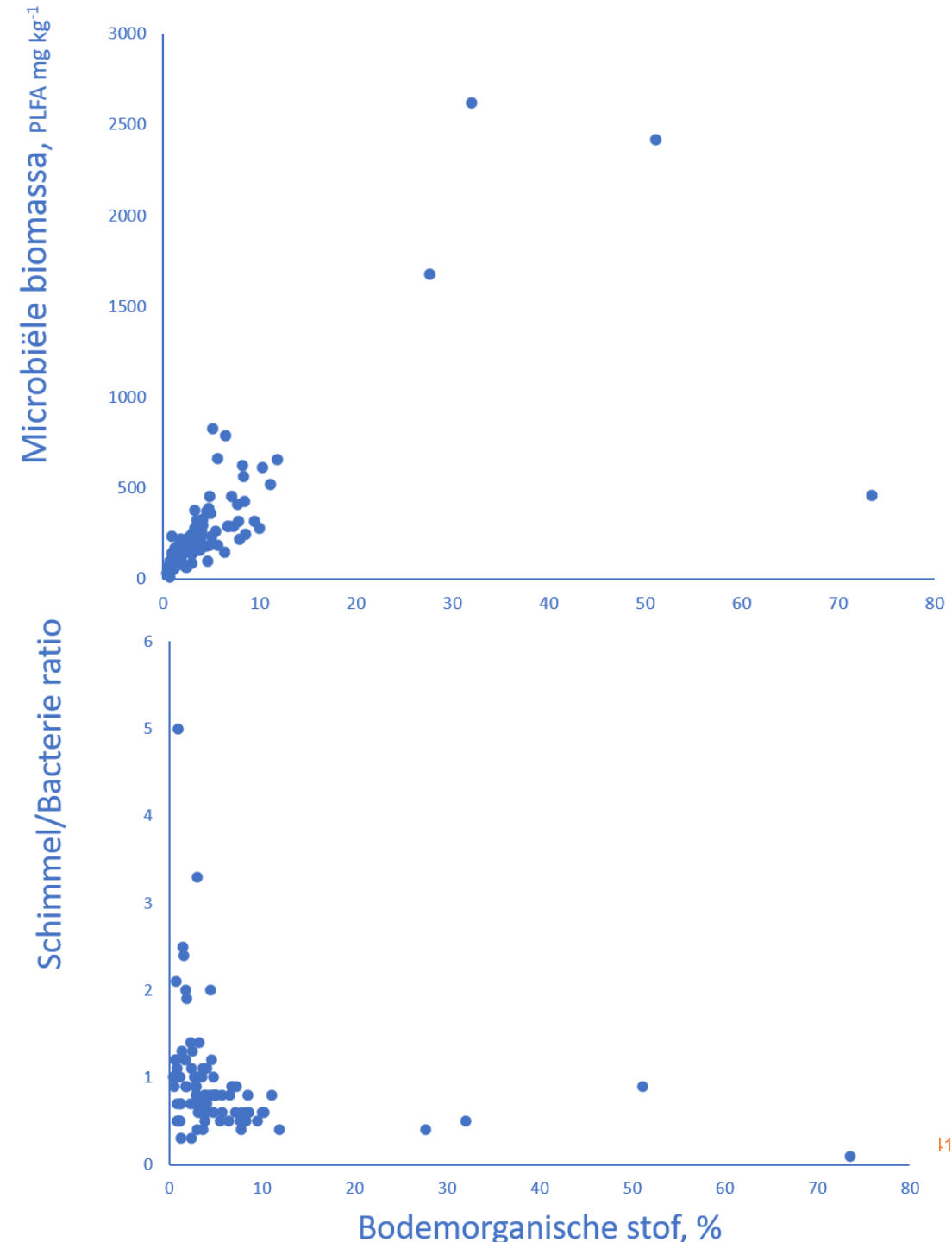
Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505–511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>

Frostegård, Å., Tunlid, A., & Bååth, E. (2011). Use and misuse of PLFA measurements in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(8), 1621–1625. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.021>

Wardle, D. A., Bardgett, R. D., Klironomos, J. N., Setälä, H., van der Putten, W. H., & Wall, D. H. (2004). Ecological linkages between and <https://doi.org/10.1126/science.1094875>

Högberg, M. N., Högberg, P., & Myrold, D. D. (2007). Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three? *Oecologia*, 150(4), 590–601.

<https://doi.org/10.1007/s00442-0060562-5>





Bodemorganische stof

- Organische stof varieert van 0,4 tot 74% (gemiddeld 5,8%)
- Belangrijk:
 - Voedsel voor bodemleven
 - Vasthouden van water
 - Buffer voor nutriënten
 - Bescherming tegen erosie
 - Bron van N en S via mineralisatie

Maar nog een andere reden waarom bodemorganische stof van belang is

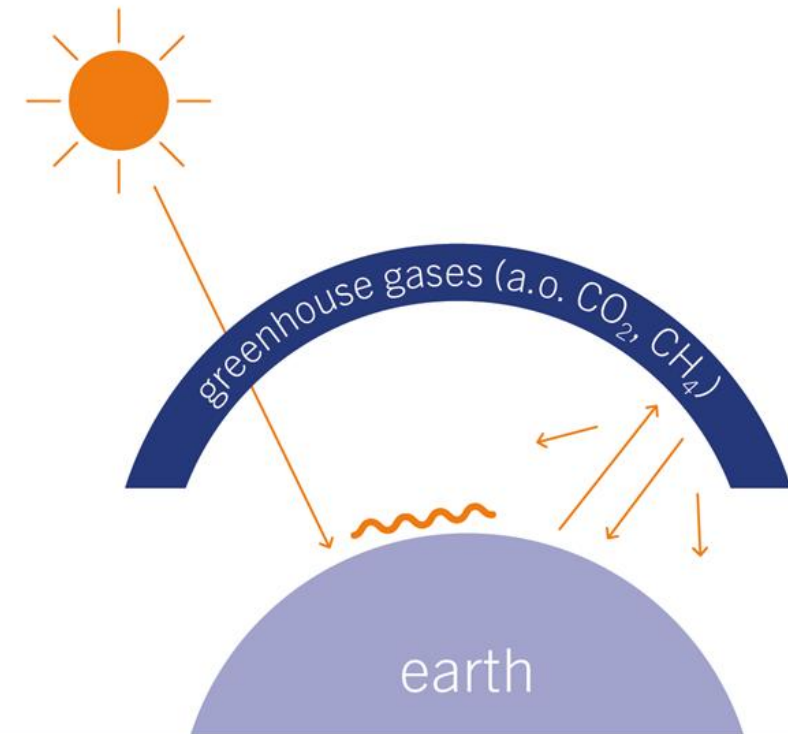




- Bodemorg. stof bestaat uit CHNOPS
 - $\pm 53\%$ koolstof (C)
 - $\pm 3\%$ stikstof (N)
 - $\pm 0,7$ zwavel (S)
 - daarnaast o.a. zuurstof (O), waterstof (H) en fosfor (P)
- Meer C in de bodem is minder CO₂ - equivalenten in de atmosfeer
- Nu al grote hoeveelheden in de bodem
- In de onderzochte gebieden ± 480 ton CO₂ equivalent per hectare (780 ton - > 3000 ton) in laag 0-30 m

Vegetatie wereldwijd bevat 300–500 Gt C Gt = 1 miljard ton (10⁹ ton) Atmosfeer bevat ~830 Gt C (CO₂ omgerekend naar C) Bodems bevatten ~1500–2400 Gt C in de bovenste meter, en tot ~4000 Gt C wanneer diepere lagen worden meegerekend

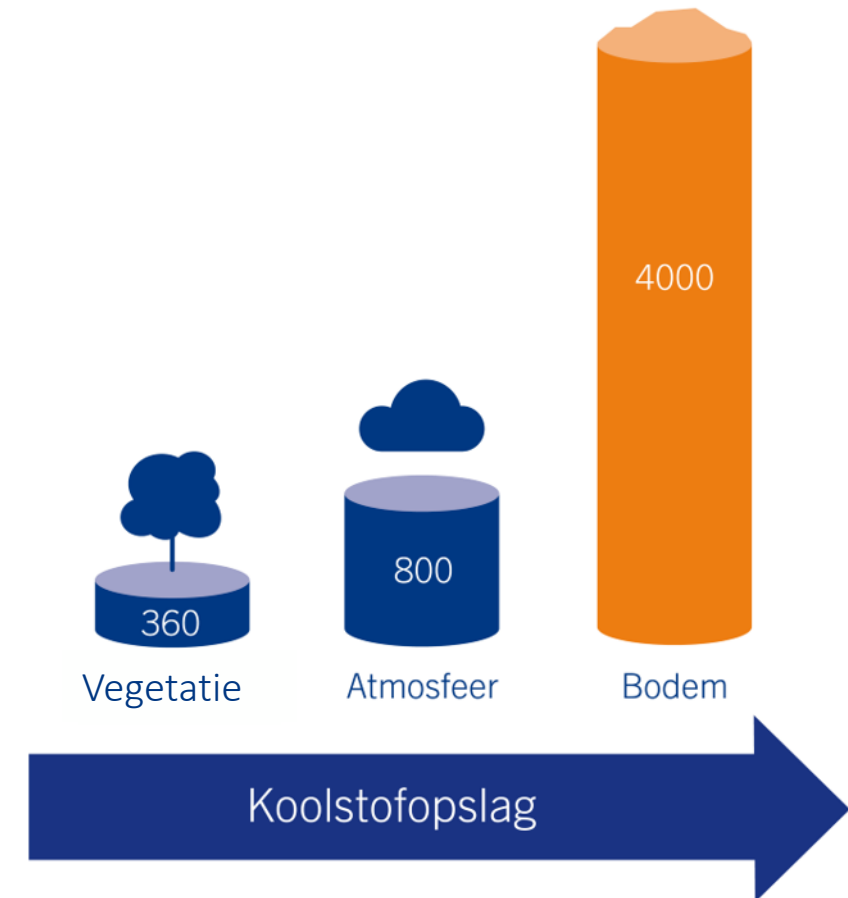
Global warming





- Bodemorg. stof bestaat uit CHNOPS
 - $\pm 53\%$ koolstof (C)
 - $\pm 3\%$ stikstof (N)
 - $\pm 0,7$ zwavel (S)
 - daarnaast o.a. zuurstof (O), waterstof (H) en fosfor (P)
- Meer C in de bodem is minder CO₂ - equivalenten in de atmosfeer
- Nu al grote hoeveelheden in de bodem
- In de onderzochte gebieden ± 480 ton CO₂ equivalent per hectare (780 ton - > 3000 ton) in laag 0-30 m

Vegetatie wereldwijd bevat 300–500 Gt C Gt = 1 miljard ton (10⁹ ton) Atmosfeer bevat ~830 Gt C (CO₂ omgerekend naar C) Bodems bevatten ~1500–2400 Gt C in de bovenste meter, en tot ~4000 Gt C wanneer diepere lagen worden meegerekend





Meer koolstof in de bodem ?

- Tijdens COP21 (Parijs, 2015) werd het initiatief "4 per 1000" gelanceerd: jaarlijks 0,4% extra bodemkoolstof als bijdrage aan klimaatmitigatie (SDG13).
- Meer koolstof (CO_2) in de bodem vraagt óók om voldoende N, P, S, andere nutriënten én actief bodemleven.
- Hoge C/N-, C/P- en C/S-verhoudingen wijzen erop dat nutriënten relatief schaars zijn ten opzichte van koolstof en kunnen een verdere opbouw van stabiele bodemorganische stof beperken.
- Vooral fosfaat lijkt in veel onderzochte natuur- en bosgronden een beperkende factor voor verdere opbouw van organische stof.
- Zonder voldoende nutriënten wordt koolstof niet/minder efficiënt omgezet naar stabiele bodemorganische stof.
- Koolstofvastlegging (biomassa productie) vraagt maar ook van een goede balans tussen koolstof, nutriënten en bodemleven.

**Koolstofopslag (CO_2) vraagt meer dan koolstof alleen.
Ook stikstof, fosfor, zwavel en bodemleven moeten meegroeien.**



Tipping, E., Lopez-Herrera, G., et al. (2016). The C:N:P:S organic matter. Biogeochemistry, 130(12), 1-19.
Van Groenigen, J. W., van Kessel, C., Hungate, B. A., Oenema, O., Powlson, D. S., & Van Groenigen, K. J. (2017). Sequestering soil organic carbon: A nitrogen dilemma. Environmental Science & Technology, 51(9), 4738–4739. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01427>
De Sisto, M. L., & MacDougall, A. H. (2024). Effect of terrestrial nutrient limitation on the estimation of the remaining carbon budget. Biogeosciences, 21, 4853–4873. <https://doi.org/10.5194/bg-21-4853-2024>

Wat gebeurt er met stikstof die via depositie in de bodem terechtkomt?

A Verarmde bodem

Hoge N-depositie, lage vastlegging



NO_3^-

uitspoeling

N wordt onvoldoende vastgelegd

- ↓ NO_3^- -uitspoeling
- ↓ Ca^{2+}
- ↓ Mg^{2+}

Verlies van basen

→ **verdere verzuring en verarming**

Ca^{2+}

Mg^{2+}

Weinig organische stof

Nitraat en basen spoelen uit naar grond- en oppervlaktewater

B Veerkrachtige bodem

Efficiënte N-vastlegging, rijke bodem



N wordt vastgelegd in bodemorganische stof

CHNOPS

C + H + N + O + P + S

- ↑ C-opslag (koolstofvastlegging)
- ↑ waterberging
- ↑ nutriëntenbuffering
- ↑ bodemleven en structuur

**Minder uitspoeling
Meer veerkracht**

Rijke organische stof



**Stabieler bodem • Minder verzuring • Minder verlies van mineralen
Betere basis voor biodiversiteit en ecosysteemfuncties**



N-depositie
stikstof uit de atmosfeer



NO_3^- (nitraat)
vorm van stikstof die
beweeglijk is in de bodem



Basische kationen
calcium en magnesium
meegenomen met uitspoelend
nitraat



Bodemorganische stof
opgebouwd uit CHNOPS
(koolstof, waterstof, stikstof,
zuurstof, fosfor, zwavel)



Vastlegging en veerkracht
betere bodemgezondheid,
meer opslag en minder verlies



4/1000: akkoord Parijs

Wat vonden we?

- Organische-stofgehalte: 5,9 %
- Organische stof bevat 53 % C en 3 % N
- **Doel Parijs** + 4 ‰ C (dus + 0,4 % C)

Wat betekent + 4 ‰ ?

- 4 ‰ van 5,9 % = stijging met 0,0236 % bodemorganische stof

Hoeveel kg is dat per ha?

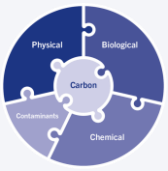
- Gemiddeld bevat 1 ha bodem (0–30 cm) $\approx 4,5 \times 10^6$ kg grond. $4,5 \times 10^6 \text{ kg} \times 0,000236 = 1060$ kg extra organische stof per hectare.

Hoeveel C en N hoort daarbij?

- C: $1060 \text{ kg} \times 0,53 = 562 \text{ kg C/ha}$
- $\text{CO}_2 = 562 \text{ C} \times 3,67 = 2060 \text{ kg CO}_2/\text{ha} =$
- N: $1060 \text{ kg} \times 0,03 = 32 \text{ kg N/ha}$

Hoeveel stikstof is er nodig voor de Klimaat doelen?

- Om een bodem met 5,9 % organische stof 4 ‰ te laten stijgen in C, is ongeveer 30–35 kg N per hectare nodig bij gemiddelde organische stof gehalte.



ABCDE-score: Integrale beoordeling van bodemgezondheid op basis van zes indicatoren uit het voorgestelde EU-kader

- ⚠ Lage pH
- ⚠ Lage fosfaatbeschikbaarheid
- ⚠ Soms cadmium
- ✓ Lage zoutgehalten (EC)
- ✓ Relatief gunstige microbiële biomassa

Bij een strikte one-out-all-out-benadering zou bijna 99% van de onderzochte bodems als onvoldoende worden beoordeeld.

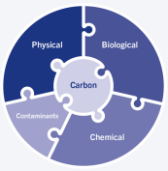
● A = 1%

● B = 18%

● C = 62%

● D = 19%

● E = 0%

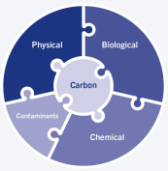


- Bos- en natuurgebieden zijn niet (enkel) bedoeld voor houtproductie of gewasgroei, maar vervullen vooral functies op het gebied van natuur, biodiversiteit, rust en beleving.
- Lage nutriëntenstatus kan daarbij een natuurlijk ecosysteemkenmerk zijn.
- De Vogelrichtlijn (Richtlijn 2009/147/EG) en de Habitatrichtlijn (Richtlijn 92/43/EEG) verplichten lidstaten om de natuurlijke habitats en soorten in een gunstige staat van instandhouding te behouden.

Hoewel bedoeld als uniform beoordelingskader is er mogelijk noodzaak om het beoordelingskader te differentiëren naar ecosysteemtype..

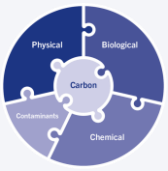
A close-up photograph of a pair of hands, likely belonging to a person of African descent, cupping a large, dark, and moist clump of soil. The soil is rich and crumbly, with some small roots visible. The hands are positioned on either side of the soil, with fingers slightly curled. The background is a solid, dark blue color. A semi-transparent blue rectangular box is overlaid in the center of the image, containing the word "Conclusies" in white text.

Conclusies



Wat viel op?

- Grote verschillen tussen gebieden
- **Zuur**: 45% heeft een $\text{pH} < 4,0$ (20% van alle analyse $\text{pH} < 3,5$)
- 50% heeft een zeer lage ECEC ($< 25 \text{ mmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) = **geen buffering van o.a. calcium**
- **Fosfaat zeer laag** (75% geen plant beschikbaarheid en 50% ook geen voorraad)
- Ook borium en molybdeen vaak zeer laag
- Aluminium springt eruit als **mogelijk ecologisch risico**
- Andere zware metalen meestal laag
- Grote verschillen in bodemleven (microbiële biomassa)
- **Verdere opbouw $\text{C}(\text{O}_2)$ voorraad** ($\pm 480 \text{ ton CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ (0-30 cm)) **beperkt** door hoge C/N-, C/P- en C/S-verhoudingen; ofwel **door nutriëntenschaarste**



Wat betekenen deze resultaten?

Wat willen we doen/behouden?

- Voldoen aan Habitat- en Vogelrichtlijn
- Voedselarme ecosystemen
- Heiden, duinen en hoogvenen
- Hoge biodiversiteit

Zijn onze bodems arm of ...?

- Nutriëntenarm ≠ nutriëntengebrek (flora en fauna)
- Toxiciteit (aluminium)
- Droogtegevoelig (P-toestand)
- Opbouwpotentieel organische stof (CO₂) niet benut

- De huidige bodemtoestand lijkt voor een belangrijk deel het resultaat van **historische** verzuring, waarbij zwaveldepositie waarschijnlijk een grotere rol heeft gespeeld dan vaak wordt aangenomen.
- Hoewel de belasting sterk is afgenomen, zorgt de beperkte natuurlijke aanvulling van calcium, magnesium en andere nutriënten voor **langzaam** **herstel**.
- De vraag is misschien niet zozeer waardoor deze bodems zijn verzuurd, maar vooral **hoe** calcium, fosfaat, borium en molybdeen worden **aangevuld** om eerdere verliezen te compenseren, als natuurlijke nalevering onvoldoende blijkt.

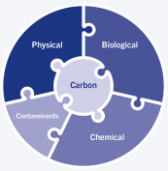
De Vries, W., & Breeuwsma, A. (1987). The relation between soil acidification and element cycling. *Water, Air, and Soil Pollution*, 35(3-4), 293-310

De Vries, W., Bolhuis, P., Van den Burg, A., & Bobbink, R. (2017). Doorgaande verzuring van bosbodems: Oorzaken en gevolgen voor het bosesysteem. *Vakblad Bos, Natuur en Landschap*, september 2017, 32-35.

Vos, M. A. E. (2024). *Impacts of harvesting practices on nutrient balances of forests under high nitrogen deposition* (doctoraats-proefschrift). Wageningen University.

A close-up photograph of a pair of hands, likely wearing white gloves, holding a large, dark, and crumbly mass of soil or compost. The soil is rich in texture, with visible roots and organic matter. A semi-transparent blue rectangular box is overlaid in the center of the image, containing the Dutch word 'Aanbevelingen' in white text.

Aanbevelingen

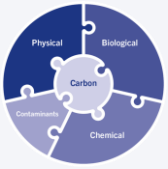


Aanbeveling 1: meet

- De natuur is niet vanzelf verzuurd
- Huidige natuur kan zichzelf niet herstellen of behouden
- Depositie is een probleem bij ongezonde bodems
- Toestand van de natuur-bodems is onderbelicht
- Bodems herstellen zichzelf niet

- Start met een landelijke nul-meting van natuurbodems.
- Monitor bodem- én ecosysteemgezondheid **periodiek** om beheermaatregelen te onderbouwen en ontwikkelingen door de tijd te volgen (EU Soil Monitoring Law).
- Combineer bodemmetingen met vegetatieanalyses (naalden, bladeren, heide, mos) om bodemeigenschappen, natuurkwaliteit en beheerdoelen beter aan elkaar te koppelen.

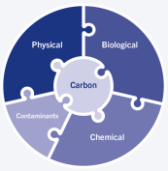




Aanbeveling 2: herstel

- Ontwikkel en test **herstelmaatregelen** gezamenlijk via Living Labs en Lighthouses met beheerders, onderzoekers en beleidsmakers gezamenlijk
 - Nulmeting/diagnose
 - Beheer en herstel
 - Meet en evalueer effect
- Richt herstelmaatregelen op **lange termijn veerkracht**, niet uitsluitend op symptoombestrijding



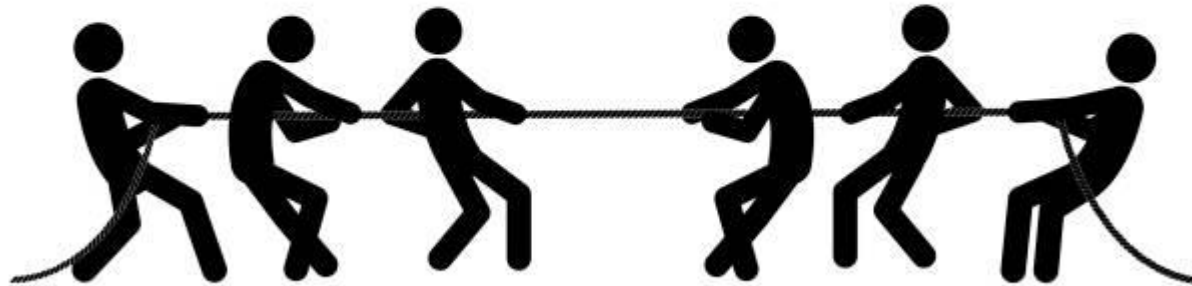


Aanbeveling 3: welke natuur ?

- Onderzoek welke natuurtypen bijdragen aan CO₂-vastlegging, N-inbouw en waterberging
- Willen we de natuur van gisteren herstellen, of investeren we in toekomst bestendige natuur die ook onder veranderende (klimaat)omstandigheden vitaal en biodivers blijft?



Wat vinden we het belangrijkst ?



Klimaat: meer koolstof in de bodem
Waterberging: meer organische stof in de bodem
...

Waterkwaliteit: minder stikstof in de bodem
Ruimte: minder koeien
...



Dank u wel

Arjan.Reijneveld@FTBNL.Eurofins.com

Karst.Brolsma@FTBNL.Eurofins.com

Maurits.Voogt@FTBNL.Eurofins.com