

Het aandeel bodemorganische koolstof (SOC) in bodemorganische stof (SOM)

Een eerste verkenning

Reijneveld, J.A., M. Kotters, K. Teuling, T.P. van Tol-Leenders,
J.P. Lesschen, J.W.H. van der Kolk & P.J. Kuikman

Colofon

Dit onderzoek is uitgevoerd door Eurofins en Wageningen UR met subsidie van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend Programma Slim Landgebruik (BO-53-002).

Juli, 2021

Contact: Slimlandgebruik@wur.nl

Reijneveld, J.A., M. Kotters, K. Teuling, T.P. van Tol-Leenders, J.P. Lesschen, J.W.H. van der Kolk & P.J. Kuikman, 2021, *Het aandeel bodemorganische koolstof (SOC) in bodemorganische stof (SOM), Een eerste verkenning*, Wageningen Environmental Research, programma Slim Landgebruik. Blz.; 28 fig.; 7 tab.; 4.

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
Achtergrond	4
Samenvatting	5
Summary	7
1 Inleiding	9
2 Materiaal & Methoden	10
2.1 Datasets	10
2.1.1 Dataset I	10
2.1.2 Dataset II	10
2.1.3 Dataset III	10
2.1.4 Dataset IV	10
2.2 Analysemethode & kwaliteitsmanagement	10
2.2.1 Klassieke analyses	11
2.2.2 Near Infra-Red Spectroscopy (NIRS) analyses	11
2.2.3 Kwaliteit	12
2.2.4 Statistiek	12
3 Resultaten	13
3.1.1 Dataset I	13
3.1.2 Dataset II	13
3.1.3 Data set III	13
3.1.4 Dataset IV	17
3.1.5 Case Study: Verloop van SOC:SOM ratio	21
3.1.6 Achterhoek (dataset IV)	21
3.1.7 Noord-Friesland en Noord-Groningen (dataset IV)	21
4 Discussie & Conclusies	22
4.1 Belangrijkste resultaten	22
4.2 Overwegingen & aanbevelingen	22
Literatuur	24
Bijlagen	27
Bijlage I Dataset II	27
Alle bodemkengetallen zonder TOC, SOM, SOC, TIC, CaCO ₃	27
Bijlage II Dataset III	28
Analysis 'SOC SOM Data set II'	28

Achtergrond

Met het klimaatverdrag van Parijs en het Europese klimaatbeleid waarin is overeengekomen om ook emissies en vastlegging van koolstof in de bodem mee te laten tellen voor de klimaatdoelstelling, is het belang van het monitoren van de hoeveelheid koolstof in de bodem toegenomen. Het kabinet wil emissies van CO₂ uit de bodem door landgebruik verminderen en vastlegging van C uit CO₂ in organische stof in de bodem stimuleren. In 2018 gaf het Ministerie van LNV opdracht een meetcampagne uit te voeren om de koolstofvoorraad in de bodem van Nederland te bepalen (CC-NL = Carbon Content Nederland) en de resultaten hiervan te vergelijken met de gegevens van eerdere meetcampagnes (uit de jaren 1990). Dit heeft geresulteerd in de rapporten:

- "Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998 – 2018)" (Van Tol-Leenders et al., 2019) en
- "An estimation of changes in organic matter contents in Dutch soils" (Knotters et al., in prep.).

Op 23 mei 2018 heeft de minister van LNV, Carola Schouten, haar bodemstrategie naar de Kamer gestuurd. Hierin verwoordt ze het streefbeeld dat in 2030 alle Nederlandse landbouwbodems duurzaam worden beheerd, zodat de bodem optimaal functioneert en de kwaliteit zo hoog mogelijk is en blijft voor gebruik door volgende generaties. In navolging van de bodemstrategie heeft de minister op 25 april 2019 de Kamer geïnformeerd over het Nationaal Programma Landbouwbodems. In haar brief schrijft ze: *"In 2019 ga ik werken aan het meetbaar maken van het streefdoel: duurzaam beheerde landbouwbodems. Ik wil een nulmeting doen naar de status van landbouwbodems in Nederland en samen met belanghebbenden een eenduidig meetinstrumentarium ontwikkelen voor bodemkwaliteit en bodembeheer."* Gebruikmakend van de dataset van CC-NL heeft dit vervolgens geresulteerd in rapport over de staat van de kwaliteit van de landbouwbodems in Nederland (Van den Elsen et al., 2020).

In aanvulling op bovenstaande resultaten is aanbevolen om op basis van de dataset van CC-NL de verhouding tussen bodemorganische stof (soil organic matter; SOM) en bodemorganische koolstof (soil organic carbon; SOC) te analyseren. Deze verhouding is van belang omdat het de basis vormt voor de berekening van de C-voorraad in de bodem. In "Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998 – 2018)" (Van Tol-Leenders et al., 2019) is de factor 0.50 gebruikt voor de SOC:SOM ratio (d.w.z. dat 50% van SOM bestaat uit SOC). In deze studie wordt de SOC:SOM ratio nader onderzocht.

Samenvatting

Wereldwijd vormt bodemorganische stof (soil organic matter; SOM) een zeer omvangrijke voorraad koolstof en daarnaast is het een belangrijke essentiële component van de bodem. SOM is opgebouwd uit koolstof (C), zuurstof (O), waterstof (H), stikstof (N), fosfaat (P) en zwavel (S). Het N-gehalte van SOM (C:N ratio) wordt veel gebruikt om SOM te karakteriseren. Het C-gehalte (bodemorganische koolstof; soil organic carbon; SOC) van SOM ofwel de SOC:SOM ratio heeft minder aandacht gekregen, mede omdat tot voor kort veelal niet beide kengetallen tegelijkertijd werden gemeten in bodemonsters (en het geen onderdeel was van landbouwkundige adviezen). Lang werd óf SOM óf SOC gemeten en werd aangenomen dat SOM voor 50% of 58% uit C bestond (zie kader).

In "Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998 – 2018)" (Van Tol-Leenders et al., 2019) zijn de resultaten van SOM (uit 1998) omgerekend naar SOC door een SOC:SOM ratio van 0.50 aan te nemen. Uiteraard heeft de gekozen factor grote invloed op de berekende SOC-voorraad in bodems. Als deze verhouding niet constant is in de tijd of reageert op landgebruik, bodemsoort, type gewas of grondbewerking, dan heeft die waarde ook invloed op de precisie van de waargenomen veranderingen in de tijd. Juist dit punt is van belang bij het opstellen van rapportages die SOC rapporteren onder het klimaatverdrag zoals afgesproken in internationale verdragen.

In deze verkennende studie wordt de SOC:SOM ratio bestudeerd en zijn de volgende vragen gesteld:

- Wat is de gemiddelde SOC:SOM ratio?
- Zijn er indicaties dat deze ratio wordt beïnvloed door landgebruik, bodemtype/ bodemkengetallen?
- Verandert de SOC:SOM ratio door de tijd?

We hebben 4 datasets benut:

- *Dataset I* is de LSK dataset uit 1998, hierin werd enkel SOM gemeten via klassieke analyses (geen SOC);
- *Dataset II* is de CC-NL dataset met klassieke analyses van SOM en tevens van SOC (> 1100 locaties, 2 bodemlagen) uit 2018;
- *Dataset III* is een set met klassieke bodemanalyses (~2500) van Eurofins Agro met SOM en ook SOC;
- *Data set IV* is de routine dataset van Eurofins Agro (> 80.000 monsters per jaar) met voornamelijk NIRS en 0.01 M CaCl₂ resultaten; ook in deze dataset is zowel SOM als SOC vastgesteld.

We vinden het volgende:

- De gemiddelde SOC:SOM ratio in minerale en venige gronden is 0.52 ± 0.08 in dataset II en IV en 0.47 ± 0.09 in dataset III. Deze resultaten zijn in overeenstemming met veel internationaal onderzoek waar een SOC:SOM ratio van omstreeks 0.50 gerapporteerd wordt. De resultaten wijken daarmee af van de vaak gehanteerde SOC:SOM ratio van 0.58, de zogeheten Van-Bemmelenfactor.
- De variatie tussen grondmonsters in SOC:SOM ratio bedraagt 0.40 – 0.55 (resp. 25- en 75-percentiel). De SOC:SOM ratio kon in zowel dataset II als III worden gerelateerd aan de zuurgraad (pH-CaCl₂), textuur (aandeel klei) en Al- (en Fe-) oxalaat. Het pH- en textuureffect is in Figuur 3-5 gebaseerd op dataset IV terug te vinden; zo hebben gronden met lagere pH (dal-, veen- en zandgronden) gemiddeld een hogere SOC:SOM ratio (> 0.50) ten opzichte van gronden met een hogere pH (< 0.50)
- In twee (beperkte) case studies vonden we geen verloop van de SOC:SOM ratio met de tijd (periode 2007 – 2020).

Wanneer SOM naar SOC wordt teruggerekend met de factor 0.50 (gemiddelde), of met 0.58 (de Van Bemmelenfactor) of met het gemeten aandeel, heeft dat effect op de gerapporteerde C- voorraad zoals dat wordt gedaan onder het klimaatverdrag en aan UNFCCC. Daarmee zou de hoeveelheid C zomaar 10% of meer kunnen afwijken (in de CCNL-rapportage zijn de periode ~1998 – ~2018 vergeleken via de factor 0.50).

Gezien de enorme variatie in ratio's en de (inter)nationale aandacht voor organische-stofvoorraad en ook voor de organische-stofkwaliteit (zoals CO₂ vastlegging in de bodem (t.b.v. klimaat), mineralisatie en opbrengstpotentie van gewassen (voedselzekerheid), weerbaarheid tegen ziekten en plagen, erosie en infiltratie van water (vermogen om negatieve effecten van intensieve regenbuien te verminderen) bevelen we aan om zowel de SOM, SOC als ook de N-totaal en S-totaal te monitoren. Deze kengetallen zijn onderdeel van de BLN (Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland)-indicatorenset. Daarnaast bevelen we aan met additionele methoden zoals pyrolyse (fractionering

In dit verslag staat het aandeel van koolstof in bodemorganische stof centraal. In dit verslag wordt dit respectievelijk aangegeven met de internationaal gebruikelijke afkortingen SOC (soil organic carbon) en SOM (soil organic matter). Dit aandeel van SOC in SOM kan op verschillende manieren worden uitgedrukt: koolstof als fractie van de bodemorganische stof (SOC:SOM ratio) of hetzelfde als percentage ($\text{SOC:SOM} \times 100\%$). Ook wordt wel het omgekeerde gebruikt: de hoeveelheid bodemorganische stof (SOM:SOC ratio). In dit verslag wordt het aandeel SOC in SOM uitgedrukt als SOC:SOM ratio.

organische stof) en PLFA (bodemleven) op zoek te gaan naar relatieve stabiliteit van specifieke fracties organische stof in de bodem. Deze leiden tot meer inzicht in veranderingen in organische-stofgehalte en -kwaliteit in de tijd.

Summary

On a global scale, about 1.5×10^{15} kg soil organic carbon (SOC) is stored in the upper meter of the soil. This amount is about three times the amount of organic carbon present in the aboveground biomass and two times the amount of C as CO₂ in the atmosphere. SOC is a major component of soil organic matter (SOM), which is decomposed biomass. Next to C, SOM also consists of oxygen (O), hydrogen (H), nitrogen (N), phosphate (P) and sulfur (S). The carbon to nitrogen ratio (C/N ratio) of SOM is commonly used to characterize SOM. However, the SOC/SOM ratio has not received much attention, partly because until recently SOM and SOC were not measured simultaneously in soil tests. Where SOM was calculated from SOC or vice versa, a constant factor of SOC/SOM of either 0.50 or 0.58 was used.

The importance of monitoring the amount of SOC in the soil has strongly increased with the Paris climate agreement and the European climate policy in which it was agreed to include emissions and carbon sequestration occurring in the soil for the climate targets. In 2018, the Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality of the Netherlands commissioned a measurement campaign to establish the (organic) carbon stocks in soil and to compare the results with data from previous measurement campaigns (from the 1990s). In "Soil organic carbon stocks of soils in the Netherlands; 1998 – 2018 (CC-NL)" (Van Tol-Leenders et al., 2019; Knotter et al., 2022), the 1998 SOM analyses were converted to SOC by applying a SOC/SOM ratio of 0.50. The chosen factor logically has a major impact on the calculated SOC stocks in soils: if this ratio is not constant over time or varies in response to local factors such as land use, type of soil, crop variety, or soil tillage, the value will also affect the accuracy of changes observed over time. It is precisely this aspect that is important in documents that report the SOC under the climate agreement as agreed in international treaties.

This exploratory study examines the SOC/SOM ratio occurring in Dutch agricultural soils. The following questions were asked in the study:

- What are the basic statistic characteristics of the SOC/SOM ratio (mean, median, standard deviation etc.)?
- Are there indications that this ratio is affected by land use or soil type/soil indicators?
- Does the SOC/SOM ratio change over time?

In this study we utilized four data sets:

- Data set I is from the 1998 monitoring campaign, in which only SOM was measured using classical analysis (the so-called LSK dataset);
- Data set II is from the 2018 monitoring campaign with classical analyses of both SOM and SOC (> 1100 locations, two soil layers) (so-called CC-NL dataset);
- Data set III is a set of classical soil analyses (approx. 2,500 samples) from Eurofins Agro including both SOM and SOC;
- Data set IV is the routine data set of Eurofins Agro (> 80,000 samples per year) which mainly includes NIRS-based determinations of among others SOM and SOC and nutrients in 0.01 M CaCl₂ extract.

We had the following main findings:

- The SOC/SOM ratio in mineral and peat soils is on average ($\pm$ standard deviation) 0.52 ± 0.08 in data set II and IV and 0.47 ± 0.09 in data set III. These results are consistent with many international studies that report a SOC/SOM ratio of approximately 0.50.
- The variation between soil samples in SOC/SOM ratio is 0.39 – 0.56 (dataset II) and 0.40 – 0.53 (dataset III) (25th and 75th percentile, respectively). In both data sets, the SOC/SOM ratio could be related to the acidity (pH in 0.01 M CaCl₂), soil texture (percentage of clay particles) and Al- and Fe-oxalate.
- In two (limited) case studies (dataset IV), we found no significant change in the SOC/SOM ratio over time (period 2007–2020).

In view of the significant variation in ratios and national and international attention for the organic carbon stock, and the organic matter quality (such as soil CO₂ sequestration (for climate), mineralization and yield potential of crops (for food security), resistance to pests and diseases, erosion, and infiltration of water (ability to reduce negative effects of

heavy rainfall), we recommend monitoring the soil-pH, soil texture, Al-, and Fe-oxalate in addition to the SOM and SOC. Some of these characteristics are part of the BLN (Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland, Dutch soil indicator set for agricultural soils) set of indicators. In addition, we recommend using additional methods such as pyrolysis (fractionation of organic matter) and PLFA analysis (soil life) to detect changes in SOC earlier, which would

This report focuses on the carbon content in soil organic matter. We use the internationally customary abbreviations SOC for soil organic carbon and SOM for soil organic matter. The amount of SOC in SOM can be expressed in different ways: carbon as a fraction of the soil organic matter (SOC/SOM ratio) or as a percentage ($\text{SOC/SOM} \times 100\%$). The reverse is also used: the amount of soil organic matter (SOM/SOC ratio). In this report, the proportion of SOC in SOM is expressed as the SOC/SOM ratio.

facilitate the early evaluation of legislation and/or management). These will result in greater insight into SOC dynamics.

1 Inleiding

Wereldwijd is bodemorganische stof (soil organic matter; SOM) een belangrijke koolstofpool en tevens een belangrijke functionele component van de bodem. SOM speelt een duidelijke en voorname rol bij onder andere het watervasthoudend vermogen en de infiltratie van water, de weerbaarheid tegen ziekten en plagen, de bewerkbaarheid van bodems en in de nutriëntencyclus via mineralisatie en immobilisatie van organische stof en nutriënten die van belang zijn in de voeding van gewassen. SOM is voornamelijk opgebouwd uit zuurstof (O), waterstof (H), koolstof (C), stikstof (N), fosfaat (P) en zwavel (S). De verhouding C:N:P:S is vaak kenmerkend voor de functies en kwaliteit van een bodem. Het N-gehalte van SOM (C:N ratio) wordt veel gebruikt om mineralisatie te voorspellen. Het C-gehalte (bodemorganische koolstof, soil organic matter; SOC) van SOM ofwel de SOC:SOM ratio heeft minder aandacht gekregen mede omdat tot voor kort veelal niet beide kengetallen tegelijkertijd werden gemeten (o.a. Tipping et al., 2016). Het was daardoor ook geen onderdeel van landbouwkundige bemestingsadviezen.

Routinematig werd op minerale akkerbouwgronden in Nederland SOC gemeten terwijl op meer venige bouwlandgronden en op alle graslandgronden (minerale en venige gronden) SOM werd gemeten. $SOC \times 2$ werd gerapporteerd als SOM door bijvoorbeeld BLGG (voorloper van Eurofins Agro) en door vele anderen. Hierbij is de SOC:SOM ratio 0.50. In andere landen en in divers (wetenschappelijk) onderzoek werd voor de SOC:SOM ratio 0.58 gebruikt. Dit werd ook wel de Van Bemmelenfactor genoemd, deze werd meestal uitgedrukt als de SOM:SOC ratio = $1/0.58 = 1.724$ (Read & Ridgell, 1922; Lunt, 1931; Broadbent, 1953). Er is aanzienlijke onzekerheid over deze conversiefactoren: grofweg worden in de literatuur voor de SOC:SOM ratio waarden tussen 0.35 en 0.70 gevonden (o.a. Rosell et al. (2001), Sleutel et al. (2007) en Pribyl (2010)).

In deze verkennende studie wordt het aandeel koolstof in organische stof geanalyseerd (SOC:SOM ratio).

Een belangrijke hypothese is dat de SOC:SOM ratio beïnvloed wordt door allerlei factoren, met name de zuurgraad (pH) van de bodem, de textuur, en wellicht ook andere factoren zoals landgebruik.

Er zal worden gekeken naar de invloed op de SOC:SOM ratio van landgebruik, bodemtypes, maar ook naar de relatie met andere bodemkengetallen (zoals pH, textuur en Fe- en Al-oxalaat). Tevens zal in twee case studies bestudeerd worden of de SOC:SOM ratio varieert in de tijd.

We konden 4 datasets benutten. *Dataset I* is de LSK dataset met klassieke SOM analyses uit 1998, *dataset II* is de CC-NL dataset met onder andere klassieke analyses van SOM en SOC (> 1100 locaties, 2 bodemlagen) (Van Tol-Leenders et al., 2019; Knotters et al., in prep.). *Dataset III* is een set met klassieke bodemanalyses (~2500 grondmonsters) van Eurofins Agro. *Dataset IV* is een set met gerapporteerde cijfers (routinematige analyses op aanvraag van de landbouwpraktijk).

2 Materiaal & Methoden

2.1 Datasets

De grondmonsters in de onderstaande datasets zijn alle geanalyseerd door Eurofins Agro, met uitzondering van de monsters uit de jaren 1990 in dataset I (geanalyseerd bij WUR).

2.1.1 Dataset I

Dataset I is de in de jaren 1990 gecreëerde dataset waarbij > 1300 locaties werden bemonsterd in het kader van het project Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK). Van deze monsters is SOM bepaald bij Soil Chemistry Laboratory Wageningen.

2.1.2 Dataset II

De LSK-locaties (zie dataset I) werden na circa 20 jaar opnieuw bezocht om onder meer SOM, SOC en de dichtheid te bepalen. Er werd bemonsterd in 2 lagen (0-30 en 30-100 cm) (Van Tol-Leenders et al., 2019).

2.1.3 Dataset III

Voor de lopende validatie van NIRS (zie later) worden wekelijks *at random* 18 monsters uit de productiestroom (zie dataset IV) geselecteerd. In deze monsters werden naast het NIRS-spectrum ook de klassieke bepalingen van SOM en SOC in duplo uitgevoerd. In een deel van de monsters zijn bovendien *at random* Fe- en Al-oxalaat bepaald. Dit is van belang omdat diverse onderzoeken relaties tussen Fe- en Al-oxides en SOM-kwaliteit benoemen (bv. Moni et al., 2010). De omvang van deze dataset bedraagt 2498 monsters.

2.1.4 Dataset IV

Dataset van Eurofins Agro met routinematig gerapporteerde analyseresultaten (leeuwendeel NIRS, zie hieronder). Dit zijn monsters die aangevraagd worden door boeren en telers (ca. 80.000 monsters per jaar). Zie voor meer informatie bijvoorbeeld Reijneveld et al. (2010). De jaren 2015 tot en met 2018 werden samengevoegd en geaggregeerd per 4-cijferige postcode. De resultaten werden verwerkt in 3 figuren (geheel Nederland, grasland en bouwland) wanneer er meer dan 20 analyseresultaten per postcodegebied waren.

Om zicht te krijgen op verloop van het SOC in de tijd zijn twee case studies uitgevoerd met dataset IV: een case study in Noord-Friesland en Noord-Groningen (postcodegebieden 88**, 90**, 91** en 99**) en een case study in de Achterhoek (postcodegebieden 69**, 70**, 71** en 72**). De gearcheverde NIRS-spectra van grondonderzoek uit deze gebieden zijn opnieuw doorgerekend met de kalibratie van februari 2021. Aangezien alle spectra vanaf eind 2007 zijn gearcheveerd, konden we derhalve 13 jaar evalueren. De gebieden werden gekozen omdat in het eerste gebied (Noord-Friesland en Groningen) SOM op grasland afneemt (Reijneveld et al., 2009) en bij het tweede gebied (Achterhoek) juist niet (Reijneveld et al., 2014).

2.2 Analysemethode & kwaliteitsmanagement

Na monsternamen en ontvangst worden de grondmonsters gedroogd (40 °C), gemalen en gezeefd (2 mm) en de grond wordt in een glazen potje (boriumsilicaat) bewaard (NEN-EN 16179, 2012). In dataset I is alleen de SOM klassiek gemeten. In dataset II en III zijn klassieke metingen en NIRS metingen gedaan. Dataset IV bestaat uit NIRS-metingen.

2.2.1 Klassieke analyses

- **SOM** wordt bepaald via gloeiverlies ("loss on ignition") bij 550 °C. (NEN 5754, 2014), en gecorrigeerd voor kristalwater dat aan kleidelen vastzit ($SOM = \text{gloeiverlies} - 0.07 \times \text{kleigehalte}$). Het kleigehalte wordt bepaald middels een dichtheidsmeting (NEN 5753, 2014).
- **SOC** wordt bepaald door verbranding (550 °C) (Yeomans & Bremner, 1991; Soon & Abboud, 1991; ISO 10694, 1995).
- **Anorganische koolstof = soil inorganic carbon (SIC)**, ook wel **total inorganic carbon (TIC)** genoemd (NEN-EN 15936, 2012). Het resultaat van deze analyse wordt benut om het $CaCO_3$ (koolzure kalk)-gehalte van de bodem te berekenen.
- **Totale koolstof (Total Carbon, TC)** verbranding bij 1150 °C waarbij koolstof in CO_2 wordt omgezet en gemeten met een IR sensor (Dumas) (NEN-EN 15936, 2012). TC omvat zowel SOC als TIC.
- **Totale stikstof (Total Nitrogen, TN)** wordt bepaald via Dumas-methode (verbranding bij 1150 °C) (ISO 13878, 1998).
- **Totale zwavel (Total Sulphur, TS)** wordt gemeten met inductief gekoppelde plasma-optische emissiespectrometrie (ICP-AES) na ontsluiting (NEN 15587-2, 1998; NEN 6966, 2005).
- Totale organische P wordt niet gemeten bij Eurofins Agro. Totale fosfaat (Total phosphorus, TP) en oxalaat-extraheerbaar (P-ox) daarentegen wel (NEN 5768, 1992; NEN 5776, 2006). Met P-ox wordt de minerale (ortho) fosfaat gemeten. $TP - P\text{-ox} = P\text{-organisch}$ (totaal organisch P, TOP).

2.2.2 Near Infra-Red Spectroscopy (NIRS) analyses

Alle bovengenoemde klassieke bepalingen zijn ook gekalibreerd via NIRS. NIRS voor vaste materialen is ontwikkeld in de jaren zestig van de vorige eeuw. Via lichtreflectie wordt een kengetal vastgesteld. NIRS wordt in Nederland al sinds 1986 gebruikt voor de analyse van gewas (mais- en graskuilen). NIRS voor grond is relatief nieuw. Eurofins Agro startte in 2004 met het aanbieden van NIRS-kengetallen in de landbouwpraktijk (N-totaal en SOM; ISO 17184, 2014). Met NIRS werd het mogelijk routinematige bodemkengetallen te rapporteren die voorheen om soms langdurige, handmatige bewerkingen in een laboratorium vroegen (bijv. textuur via pipetmethode of CEC via cohexamine), vaak ook met extractiemethoden die voor mens en natuur onvriendelijk zijn (bv. waterstofperchloraat benodigd bij P-totaalbepaling). NIRS is een niet-destructieve, indirecte meting waarbij het gemeten reflectogram wordt gecorreleerd aan metingen via klassieke bepalingen. Voor grond zijn grote hoeveelheden klassieke bepalingen nodig om NIRS te kalibreren. Na kalibratie is het mogelijk om snel bodemkengetallen te meten. NIRS-bepalingen die in dit rapport beschreven zijn, zijn gekalibreerd op gedroogde (40°C), gemalen en gezeefde (2 mm) grond. De NIRS-metingen vonden plaats onder geconditioneerde omstandigheden (o.a. vaste temperatuur meetruimte). Met name het drogen van de grond is essentieel. Hoewel er veel initiatieven zijn om in niet-gedroogde grond te meten, is het vochtgehalte sterk bepalend voor de kwaliteit van de NIRS-metingen. NIRS-resultaten van in-situ metingen kunnen daarom geenszins worden vergeleken met de onder geconditioneerde omstandigheden gemeten resultaten uit dit rapport.

De kwaliteit van de NIRS-kengetallen verbetert continu, maar is afhankelijk van het kengetal. De relatie tussen klassieke analyse en NIRS is als volgt: N-totaal, S-totaal, TC, SOM, SOC en klei hebben alle een $r^2 > 0.95$ en RPD (zie hierna) > 4.50 en P-totaal en pH- $CaCl_2$ hebben een $r^2 > 0.85$ en RPD-waarden > 2.75 (Reijneveld et al., in prep.). De RPD is de "Ratio of Performance to Deviation", een maat om de kwaliteit van een NIRS-bepaling te kwantificeren. Chang et al. (2001) classificeren de RPD-waarden kwalitatief als: $RPD < 1.4$: model is niet betrouwbaar; $1.4 < RPD < 2$: redelijk betrouwbaar model en $RPD > 2$ uitstekend betrouwbaar model). Op basis van deze indeling zijn alle hierboven behandelde NIRS-kengetallen dus van uitstekende kwaliteit.

2.2.3 Kwaliteit

De kwaliteit van de NIRS-analyses wordt in het laboratorium gecontroleerd met behulp van 1^e-, 2^e- en 3^e-lijnscontrolemonsters:

- Voor de 1^e-lijnscontrolemonsters worden standaard grondmonsters, waarvan de gehalten bij de analist bekend zijn, aangeboden aan het laboratorium. De analist kan daarmee controleren of het standaardmonster een voldoende juist resultaat oplevert dat aansluit bij eerder waarnemingen. Er zijn 2 controlemonsters (zand en klei) per 50 grondmonsters.
- Voor de 2^e-lijnscontrolemonsters worden standaardmonsters onherkenbaar aangeboden in het laboratorium. Daarmee kan kwaliteitscontrole vóór rapportage, maar niet direct na analyse plaatsvinden.
- Voor de 3^e-lijnscontrolemonsters worden door controleorganisatie monsters met onbekende gehalten aangeboden, een analyse vindt plaats en de resultaten worden beoordeeld door deze partijen (Eurofins Agro werkt daartoe onder andere met ILVO, Wepal ISE en VITO).

2.2.4 Statistiek

Beschrijvende statistiek: Onder andere het 25- (1e kwartiel), 50- (mediaan), en het 75-percentiel (3e kwartiel) zijn bepaald naast gemiddelden, de standaardfout en de variatiecoëfficiënt.

Vergelijkende statistiek: Hiertoe is Canoco (<https://www.wur.nl/en/show/Canoco-for-visualization-of-multivariate-data.htm>) benut. Met Redundancy Analysis (RDA) is onderzocht in welke mate bodemkengetallen de variatie in SOC:SOM ratio verklaren.

Bij de statistische analyses is geen gebruik gemaakt van de 'traditionele' grondsoortbenamingen duinzand, dekzand, zeeklei, rivierklei, maasklei, dalgrond, kleiig veen, veen en löss, omdat deze codes veelal door de telers/boer/voorlichter zelf worden opgegeven en daardoor enigszins onbetrouwbaar zijn. Er is voor gekozen zoveel mogelijk met de gemeten bodemkengetallen klei (< 2 µm), silt (2 – 50 µm), zand (> 50 µm en < 2000 µm), organische stof en kalk te werken. Deze kengetallen samen bepalen de grondsoort in de internationale benamingen (minerale en veen textuurdriehoeken).

3 Resultaten

3.1.1 Dataset I

In dataset I werd alleen de SOM bepaald en niet de SOC. In deze dataset kunnen we derhalve niet de SOC:SOM ratio bestuderen.

3.1.2 Dataset II

De resultaten van dataset II staan weergegeven in Tabel 1 en 3.2. De gemiddelde SOC:SOM ratio is 0.52. Landgebruik (akkerbouw, grasland, rest) lijkt hierop geen effect te hebben, hoewel de spreiding (StDev.) en interkwartielafstand (IKA) bij grasland opvallend geringer is dan bij akkerbouw en 'rest'.

In de diverse subgroepen varieert het gemiddelde aandeel de SOC:SOM ratio tussen 0.51 en 0.56. De mediane waarden verschillen nauwelijks van de gemiddelden. De 25- en 75-percentielen liggen tussen 0.34 en 0.58. Op zwaardere (klei > 40%) lijkt de SOC:SOM ratio relatief hoog te zijn en neemt de spreiding (StDev. en IKA) af. Bij gronden met hogere SOM-gehalten neemt de spreiding van de SOC:SOM ratio (Tabel 2). De SOC:SOM ratio wordt niet beïnvloed door het CaCO₃-gehalte (Tabel 2).

Tabel 1. SOM:SOC ratio: gemiddelde, mediaan, StDev.(standaarddeviatie); Perc. (percentiel); IKA (Inter Kwartiel Afstand; de afstand tussen de 25- en 75-percentielwaarden). "Rest" is de benaming voor alle natuurgegronden, bosgronden, golfterreinen, voetbalvelden e.d.

SOC:SOM ratio	Totaal dataset	Totaal 0 -30 cm	Totaal > 30 cm	Akkerb.	Grasland	Rest	Totaal, klei < 3%	Totaal, klei > 40%
Gemiddelde	0.52	0.53	0.51	0.52	0.51	0.51	0.53	0.56
StDev.	0.08	0.06	0.10	0.08	0.05	0.10	0.08	0.05
Mediaan	0.52	0.53	0.51	0.52	0.52	0.52	0.53	0.55
Perc. 25	0.39	0.44	0.34	0.48	0.50	0.47	0.50	0.53
Perc. 75	0.56	0.56	0.56	0.56	0.54	0.57	0.57	0.57
IKA	0.18	0.12	0.22	0.08	0.04	0.10	0.07	0.05
Aantal	2298	1151	1146	698	924	678	850	123

Tabel 2. SOC:SOM ratio resp. per SOM-klasse en per CaCO₃-klasse.

	SOM						CaCO ₃ (kalkgehalte)		
SOC:SOM ratio	<5%	5-10%	10-15%	15-25%	>25%		<1.5%	1.5-5%	>5%
Gemiddelde	0.51	0.54	0.55	0.54	0.53		0.53	0.53	0.51
StDev.	0.09	0.07	0.06	0.04	0.02		0.09	0.07	0.08
Mediaan	0.52	0.54	0.54	0.55	0.52		0.53	0.52	0.52
Perc. 25	0.47	0.51	0.52	0.52	0.51		0.50	0.50	0.49
Perc. 75	0.56	0.58	0.58	0.57	0.54		0.57	0.56	0.56
IKA	0.09	0.07	0.06	0.05	0.02		0.07	0.06	0.07
Aantal	1481	402	104	127	169		1062	221	1007

De SOC:SOM ratio laat zich verklaren door textuur, zuurgraad (pH), en Al-oxalaat, hoewel nooit meer dan 14% (adjusted explained variation) (Bijlage I).

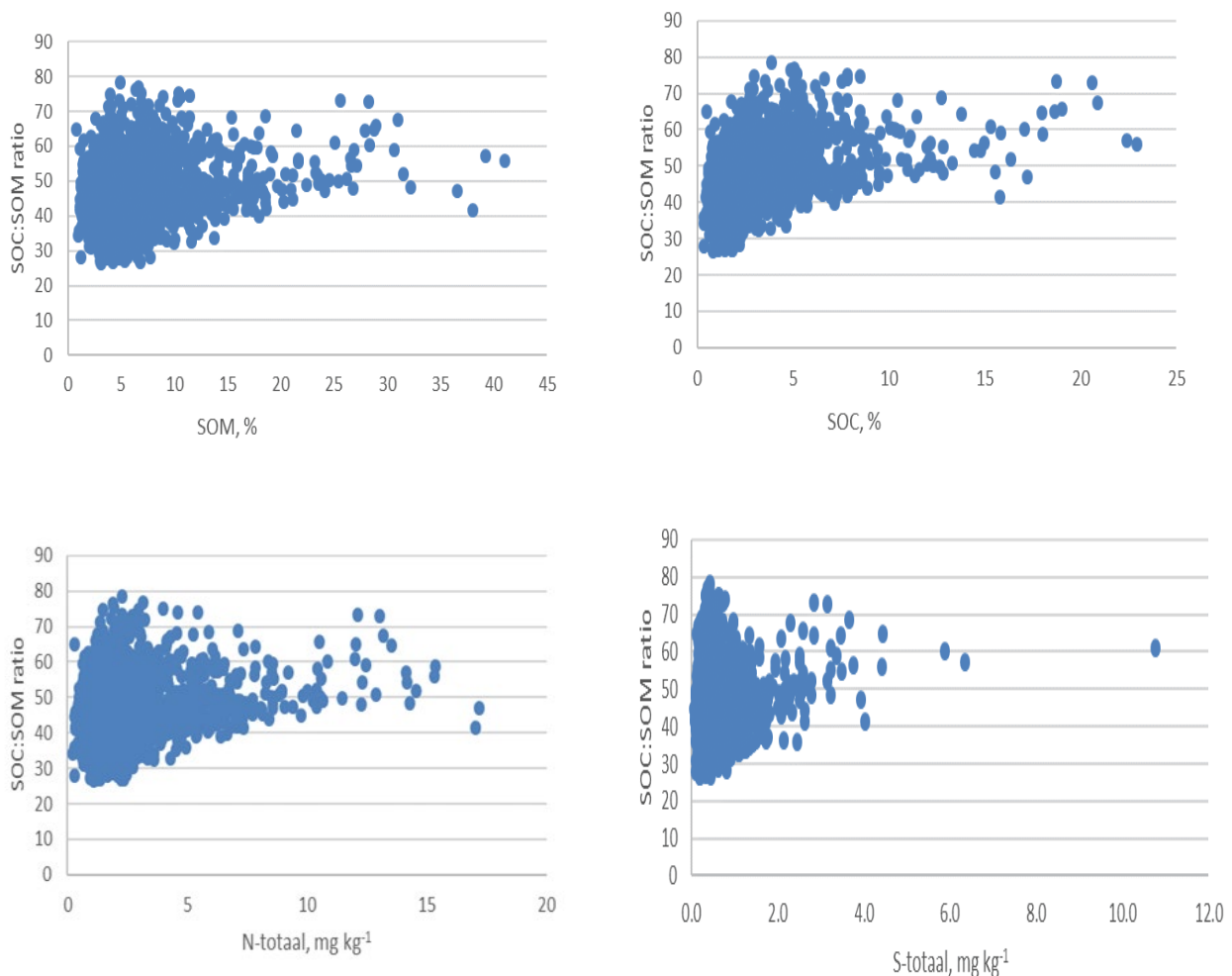
3.1.3 Data set III

In deze set met klassieke bepalingen vinden we een gemiddelde SOC:SOM ratio van 0.47 (Tabel 3). De relaties tussen de SOC:SOM ratio en de diverse kengetallen in deze dataset zijn weergegeven in Figuur 1. Vooral de spreiding valt op; zo varieert de SOC:SOM ratio tussen 0.35 en > 0.70 op gronden met kleipercantage < 4%. De spreiding is geringer bij zwaardere gronden, maar blijft aanzienlijk.

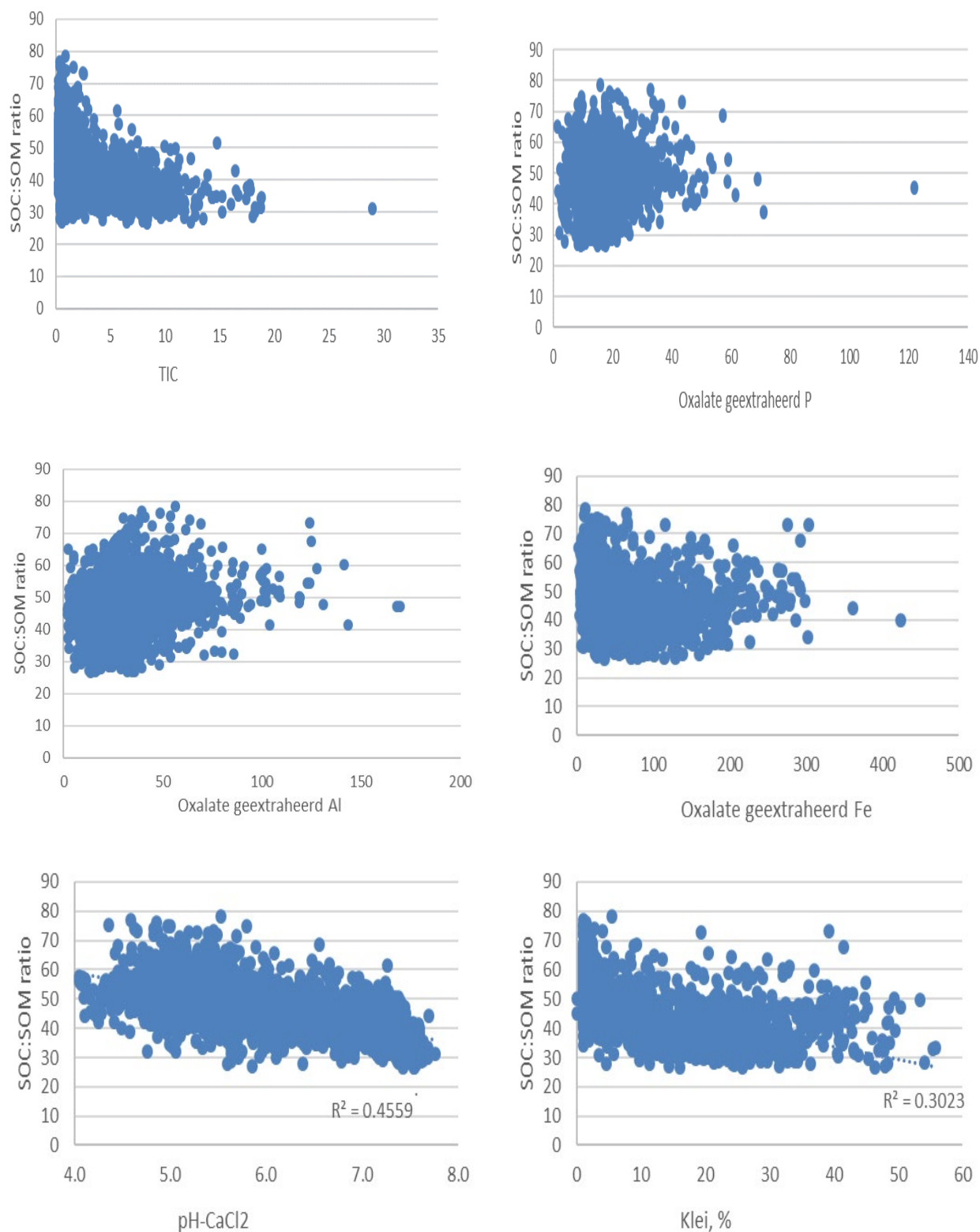
De SOC:SOM ratio laat zich verklaren door textuur, zuurgraad (pH), en Al-oxalaat (Figuur 2), tot wel > 0.70% (adjusted explained variation) (Bijlage II). Volgens deze analyse is de SOC:SOM ratio hoger op lichte gronden (hoog zandaandeel, laag kleiaandeel) en op zuurdere gronden met een laag kalkgehalte.

Tabel 3. Beschrijvende statistiek van de kengetallen in dataset III ($n = 2498$): N-totaal, S-totaal en SIC in mg kg^{-1} , P-, Al- en Fe-oxalaat in mmol kg^{-1} .

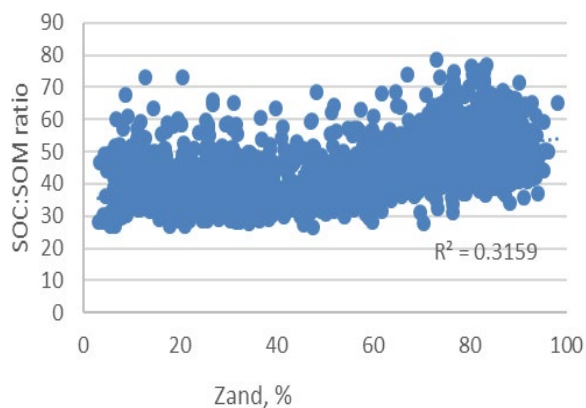
	SOC:SOM ratio	SOM, %	SOC, %	N-tot	S-tot	SIC	P-ox	Al-ox	Fe-ox	pH-CaCl ₂	Klei, %	Zand, %
Gemiddelde	0.47	5.8	2.8	2.3	0.5	2.3	17.2	32.1	54.8	6.0	10	62
StDev.	0.09	4.2	2.3	1.9	0.5	3.2	7.8	19.1	50.1	1.0	11	26
Mediaan	0.48	4.6	2.2	1.7	0.3	0.8	16.0	29.3	37.3	5.8	4	74
Perc. 25	0.40	3.4	1.4	1.2	0.2	0.5	12.3	18.3	21.6	5.2	1	39
Perc. 75	0.53	6.7	3.2	2.6	0.5	2.6	20.7	41.4	71.6	7.0	17	83
IKA	0.12	3.3	1.8	1.4	0.3	2.1	8.4	23.1	50.0	1.9	16	44



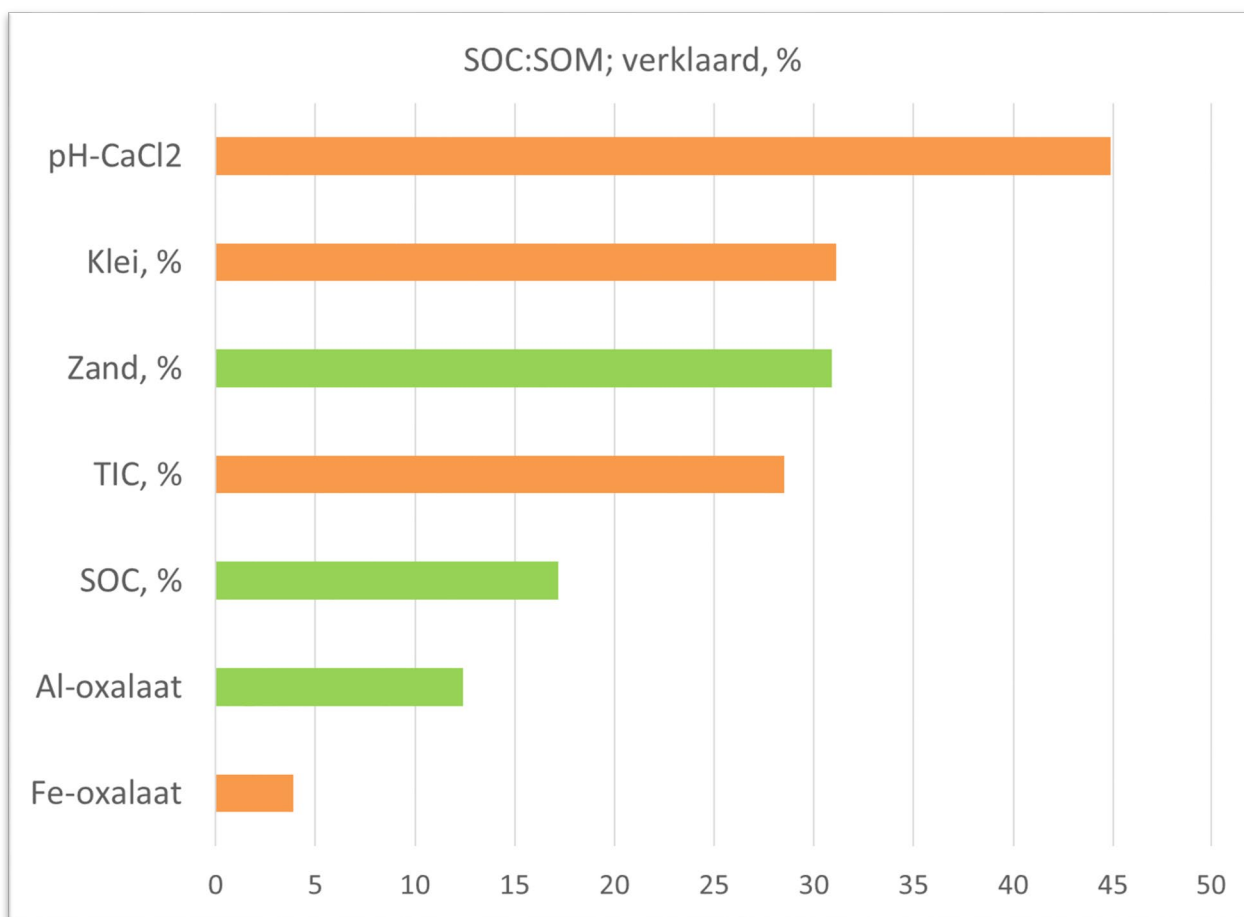
Figuur 1. Relatie tussen diverse bodemkengetallen en de SOC:SOM ratio ($\times 100$) (TIC = SIC in mg kg^{-1} en P-, Fe- en Al-oxalaat in mmol kg^{-1}).



Figuur 1 (vervolg). Relatie tussen diverse bodemkengetallen en de SOC:SOM ratio ($\times 100$) (TIC = SIC in mg kg^{-1} en P-, Fe- en Al-oxalaat in mmol kg^{-1}).



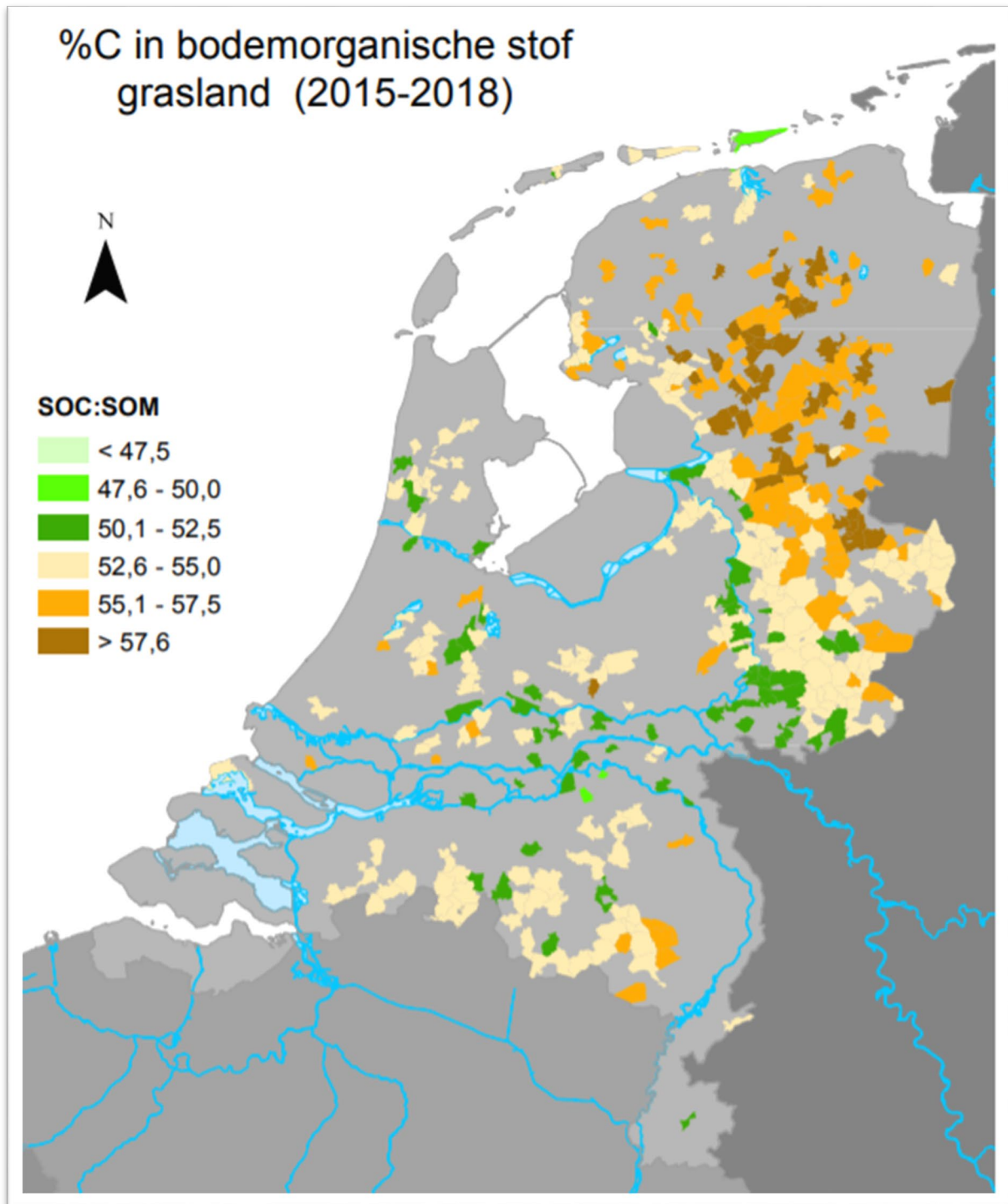
Figuur 1 (vervolg). Relatie tussen diverse bodemkengetallen en de SOC:SOM ratio ($\times 100$) (TIC = SIC in mg kg^{-1} en P-, Fe- en Al-oxalaat in mmol kg^{-1}).



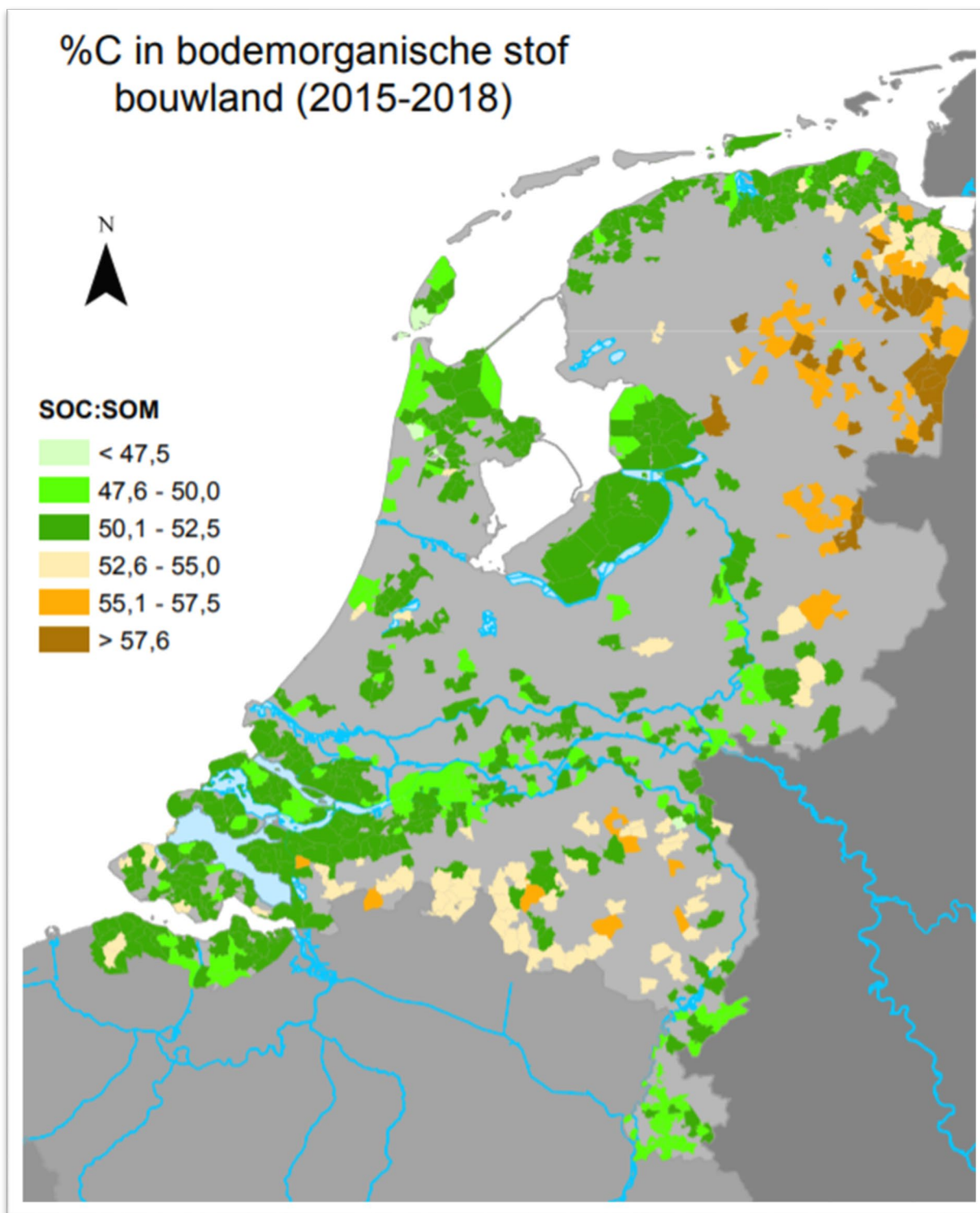
Figuur 2. Procentuele verklaring van SOC:SOM ratio. Oranje geeft een "negatieve" relatie aan (bijv. hogere pH betekent een geringere SOC:SOM ratio). Groen staat voor een "positieve" relatie (op gronden met een hoger % zand wordt een hogere SOC:SOM ratio gevonden). Het totale model verklaart (adjusted) 72.2% (Zie Bijlage II).

3.1.4 Dataset IV

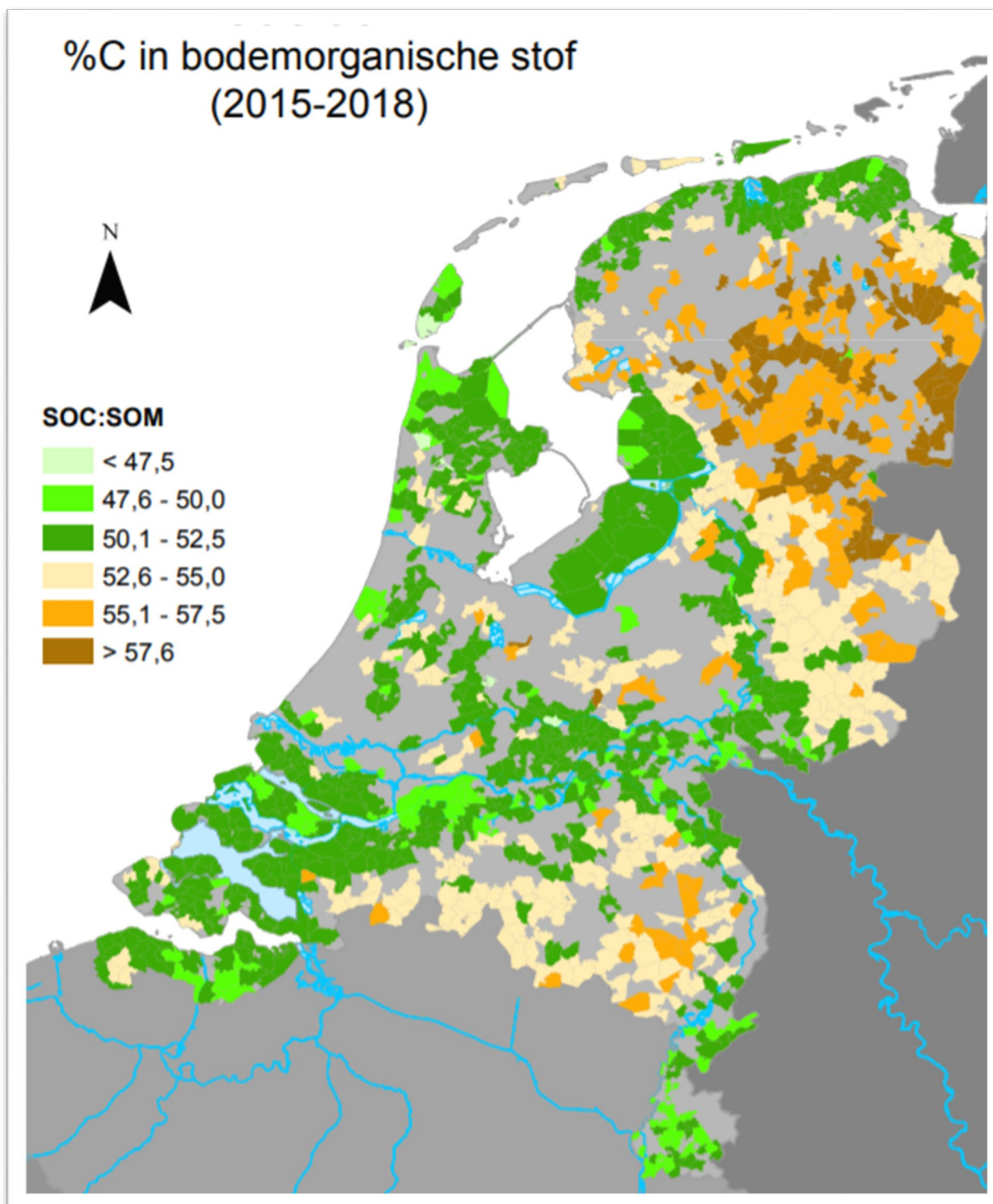
Voor de routinematig gerapporteerde metingen op basis van NIRS ligt de gemiddelde SOC:SOM ratio voor Nederland (jaren 2015 – 2018) op 0.526, voor grasland ligt het gemiddelde op 0.54 en voor bouwland op 0.52.



Figuur 3. SOC:SOM ratio x 100% (= percentage SOC in SOM) van grasland (0-10 cm) in Nederland (2015 – 2018).



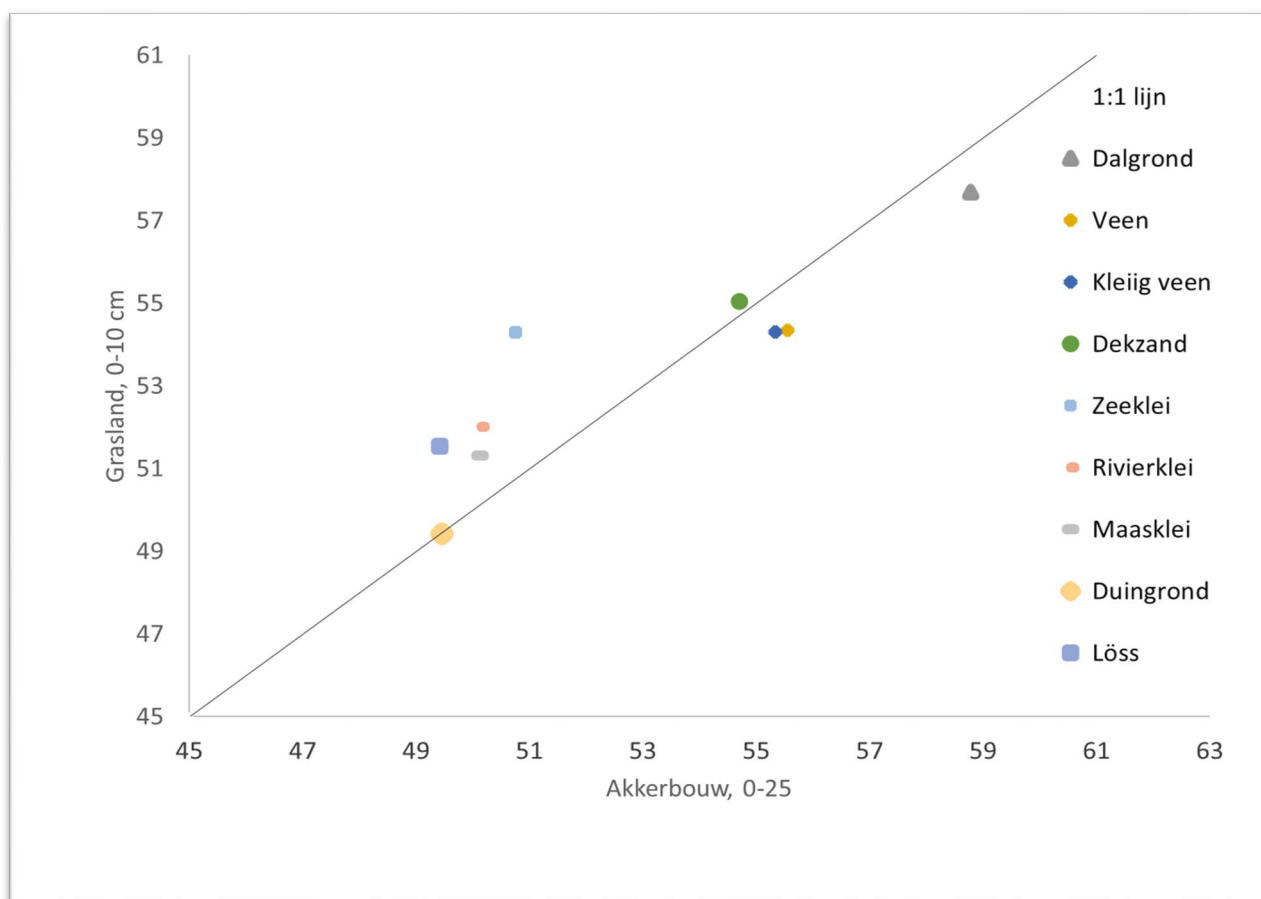
Figuur 4. SOC:SOM ratio $\times 100\%$ (= percentage SOC in SOM) van bouwland (0-25 cm) in Nederland (2015 – 2018).



Figuur 5. SOC:SOM ratio x 100% (= percentage SOC in SOM) van en gecombineerd gras- en bouwland in Nederland (2015 - 2018).

Tabel 4. Gemiddelde SOC:SOM ratio per grondsoort in de sectoren grasland (0-10 cm) en akkerbouw (0-25 cm) 2015 – 2018.

Code grondsoort	Omschrijving	Akkerbouw/Mais			Grasland	
		SOC:SOM ratio	StDev.		SOC:SOM ratio	StDev.
0	Duingrond	0.49	0.09		0.49	0.08
10	Dekzand	0.55	0.04		0.55	0.04
20	Zeeklei	0.51	0.03		0.54	0.03
40	Rivierklei	0.50	0.02		0.52	0.03
45	Maasklei	0.50	0.02		0.51	0.03
50	Dalgrond	0.59	0.04		0.58	0.04
60	Kleilig veen	0.55	0.04		0.54	0.04
62	Veen	0.60	0.05		0.54	0.04
71	Löss	0.49	0.05		0.52	0.03



Figuur 6. SOC:SOM ratio $\times 100\%$ (aandeel SOC in SOM) akkerbouw versus grasland (gebaseerd op Tabel 4). De doorgetrokken lijn is de 1:1 lijn.

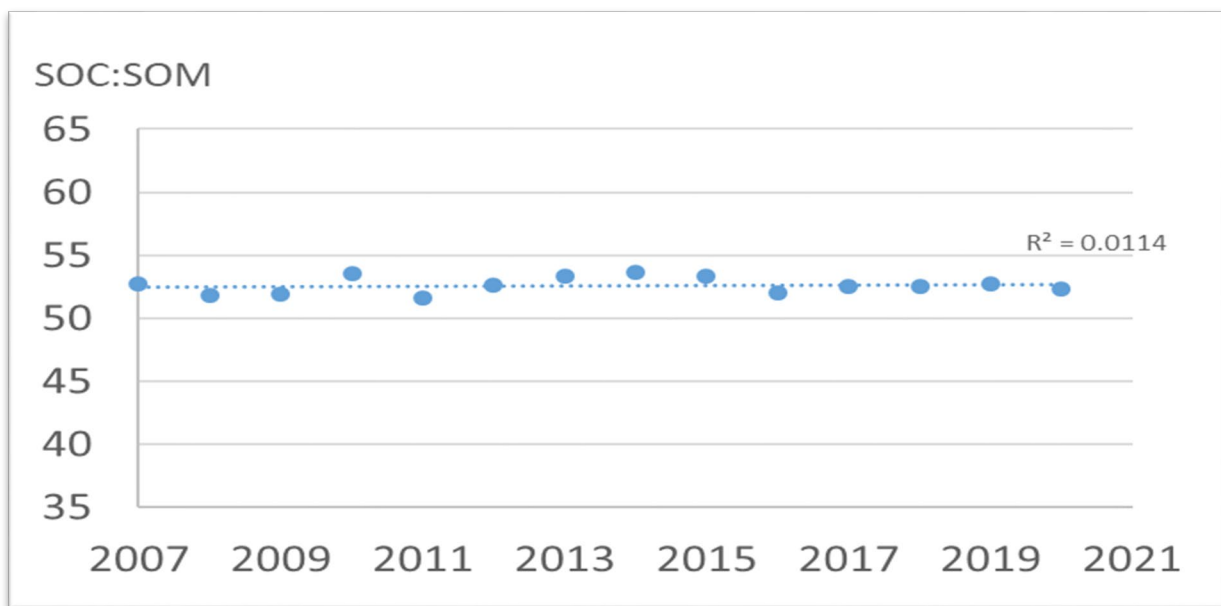
In Tabel 4 en Figuur 6 is de SOC:SOM ratio per grondsoortcode en per hoofdsector (akkerbouw en grasland) gegeven. Dalgrond (reclaimed peat soil) heeft gemiddeld de hoogste SOC:SOM ratio. Duingrond (lichte textuur en hoge pH) heeft een SOC:SOM ratio die 6 – 9%-punt geringer is dan dalgrond. De SOC:SOM ratio's van akkerbouw en grasland ontlopen elkaar niet veel (Figuur 6). Alleen bij de kleigronden en löss is de SOC:SOM ratio bij grasland iets hoger maximaal 2 procentpunten) dan bij akkerbouw.

3.1.5 Case Study: Verloop van SOC:SOM ratio

Met dataset IV werd het verloop van de SOC:SOM ratio in de tijd in kaart gebracht voor twee regio's.

Reijneveld et al. (2009, 2014) lieten zien dat het SOC-gehalte afneemt op de zeekleigronden in noord-Nederland (postcodes 88**, 90**, 91** en 99**; Friesland en Groningen), terwijl dit gelijk blijft in de Achterhoek.

3.1.6 Achterhoek (dataset IV)



Figuur 7. Verloop van de SOC:SOM ratio (x 100) van 2007 – 2020 op zandgrond – grasland in de Achterhoek

De SOC:SOM ratio blijkt met een gemiddelde van 0.53 in de Achterhoek (zandgrond, gras) gelijk te blijven over de periode 2007 – 2020 (Figuur 7).

3.1.7 Noord-Friesland en Noord-Groningen (dataset IV)

In Noord-Friesland en Groningen is geen verdere afname van het SOC-gehalte gevonden, na de geconstateerde afname (Reijneveld et al., 2009) in de periode 1984 – 2000. Het SOC-gehalte bedroeg rond 2000 4.8% en in de dataset van deze case study ligt het gemiddeld op 4.7%. De SOC:SOM ratio blijft hier constant op ongeveer 0.46 (het SOM-gehalte is ongeveer 10%).

4 Discussie & Conclusies

4.1 Belangrijkste resultaten

De gemiddelde SOC:SOM ratio (aandeel koolstof in organische stof) varieert in de benutte datasets tussen 0.47 en 0.52, hetgeen gelijk staat aan een SOM:SOC ratio tussen 1.92 en 2.12. Deze factoren wijken sterk af van de zogeheten Van-Bemmelenfactor van 1.72 (Tabel 1; 3.3 en dataset III).

De SOC:SOM ratio varieert sterk; de 25- en 75-percentielen liggen tussen 0.34 en 0.58 (Tabel 1 en Tabel 3 en Figuur 3-5).

De SOC:SOM ratio is gerelateerd aan de bodemkengetallen met name zuurgraad en daarnaast ook textuur en Al-oxalaat. Gronden met lagere pH (dal-, veen- en zandgronden) hebben gemiddeld een hogere SOC:SOM ratio (Bijlage I, II en Figuren 1, 2 en 4).

In de case studies (Achterhoek en N-Nederland; dataset IV) vinden we geen verandering in de SOC:SOM ratio in de periode 2007 – 2020 (Figuur 7).

4.2 Overwegingen & aanbevelingen

1. Dataset II en III laten in hoofdlijn eenzelfde trend zien. Gemiddeld is de SOC:SOM ratio 0.50. Dit wijkt duidelijk af van de Van Bemmelenfactor (0.58% of SOM:SOC ratio = 1.724).
2. Een gemiddelde waarde van de SOC:SOM ratio van 0.50 werd ook door Pribyl (2010) aannemelijker gevonden dan 0.58. Klingenfuß et al. (2014) vonden, bij enige gronden, gemiddelde SOC:SOM ratio's (afhankelijk van veentype) tussen 0.41 en 0.57. Eerder rapporteerden Howard & Howard (1990) gemiddelden tussen 0.48 en 0.56 (afhankelijk van grondtype/venigheid).
3. In de LSK-dataset in de jaren 1990 is uitsluitend SOM gemeten. SOC is berekend met de aanname dat SOC:SOM ratio 0.50 bedraagt. In deze verkennende studie vinden we dat de SOM:SOC ratio sterk kan variëren en daarmee een effect zal hebben op de gerapporteerde C-voorraad zoals dat wordt gedaan onder het klimaatverdrag en aan UNFCCC.
4. In datasets II en III zijn zuurgraad en textuur gerelateerd aan het aandeel C in organische stof, maar de verklaring varieert sterkt (Bijlage I en II). Mogelijk vindt dit zijn oorzaak in een afwijkende monsternamediepte. Ook de omvang van de datasets kan hier een rol spelen.
5. Met name bij lagere SOM-gehalten spelen onzekerheden in monsternamen en analyse een relatief grote rol, en zullen daarmee een effect hebben op een deel van de gevonden variatie in de SOC:SOM ratio. Evenwel wordt niet verwacht dat deze foutenbronnen een relatief grote bijdrage leveren, temeer daar de analyses in dataset II, en III in duplo zijn uitgevoerd.
6. Ondere andere Baum et al. (2013) vonden een effect van bodemleven op de SOC:SOM ratio. Eurofins Agro meet sinds een paar jaar bodemleven (o.a. totale microbiële biomassa) via de Phospholipid fatty acid analyse (PFLA) (gebaseerd op o.a. Willers et al., 2015). In dataset II is dit in een subset gemeten en deze subset leent zich voor verder onderzoek. De ratio van microbiële biomassa en SOC wordt door Sparling (1992) als "sensitive indicator" van veranderingen in organische stof (waaronder de SOC:SOM ratio) gezien; mogelijk geeft dit aanleiding voor verdere studie.
7. Dierlijke mestgiften uit het recente verleden hebben mogelijk een effect op de SOC:SOM ratio. Op duingronden was het jarenlang gangbaar om vaste dierlijke mest te benutten. Juist op duingronden blijkt de SOC:SOM ratio relatief laag te zijn. Het aandeel N, S (en P) in SOM is hoger, zeer waarschijnlijk dus door dit historisch management (aanvoer van dierlijke mest). Deze gronden zullen mogelijk sneller mineraliseren waarmee ook de SOC-voorraad in deze bodems zal afnemen (zie ook Pronk et al., 2012).
8. Kirkby et al. (2011; 2014) geven aan dat optimale SOC-opbouw gerelateerd is aan optimale C:N:P:S ratio's; bij suboptimale verhoudingen wordt de SOC-opbouw beperkt. In lijn hiermee zouden de C:N:P:S ratio's van de

Nederlandse gronden in een vervolgstudie meer aandacht moeten krijgen. Dit kan met (een deel) van de datasets uit deze verkennende studie.

9. Het effect of gewasresten op de SOC:SOM ratio kon met deze datasets niet bestudeerd worden, maar gezien de gebruikelijk grote aanvoer van gewasresten verdient dit wel meer aandacht. Zo lieten Conijn & Lesschen (2015) en Lesschen et al. (2020) zien dat de aanvoer van gewasresten en de turnover van wortels de aanvoer van dierlijke mest overstijgt. De C:N, C:S, C:P ratio's van deze aanvoerposten hebben mogelijk effect op de SOC:SOM ratio.
10. Betekent een hogere SOC:SOM ratio nu een indicatie van meer stabiele verbindingen in de SOM of juist van meer jonge nieuwe en kwetsbare afbreekbare organische stof? Mogelijk is een causale relatie tussen de SOC:SOM ratio en de stabiliteit van organische stof onbekend. Meer literatuuronderzoek is nodig.
11. De SOC:SOM ratio blijft in de tijd constant in de twee case studies. Als het C-gehalte in andere regio's met andere grondsoorten niet constant is in de tijd heeft dit ook invloed de waargenomen/gerapporteerde veranderingen in de tijd (LSK 1998 – CC-NL 2018; Van Tol-Leenders et al., 2019 en Knotters et al., in prep.). Dit punt is dus van belang bij het opstellen van rapportages die SOC rapporteren onder het klimaatverdrag zoals afgesproken in internationale verdragen. Hier wordt een verdere verdieping met de beschikbare datasets sterk aanbevolen.

Wanneer in de LSK-dataset (jaren '90; dataset I) 5% SOM werd gemeten, dan is dat 2.9% SOC bij gebruik van een SOC:SOM ratio van 0.58 (de Van Bemmelenfactor) en 2.5% SOC wanneer gerekend wordt met een SOC:SOM ratio van 0.50.

Wanneer vervolgens later in de CC-NL 2018 dataset (dataset II) 2.7% SOC gevonden wordt, dan is dat een daling ten opzichte van 2.9% (Van Bemmelenfactor), maar een stijging als dit vergeleken wordt met 2.5% (SOC:SOM ratio 0.50). Overigens zijn beide factoren (0.58 en 0.50) gemiddelden: in werkelijkheid varieert de SOC:SOM ratio in grote mate.

12. In het CC-NL (2018) onderzoek is uitgegaan van een SOC:SOM ratio van 0.50. Wat voor effect zouden andere (variabele) uitgangspunten hebben gehad op de interpretatie van de CC-NL dataset en daarmee over de veranderingen in koolstof voorraad in de laatste > 20 jaar? De verkenning geeft aanleiding scenario's door te rekenen in de CC-NL set.
13. Bovenstaand punt kan ondervangen worden door altijd SOM te meten en aan te nemen dat het C-aandeel van SOM niet verandert. In de meest monitoringstudies wordt nu echter ingezet op SOC. Het zou beter zijn altijd beide (SOM en SOC) te bepalen, mede gezien de aandacht voor niet alleen de kwantiteit maar ook de kwaliteit van SOM. Daarnaast zou ook de nutriëntenstatus van de bodem routinematig meegenomen moeten worden bij C-monitoringen aangezien er sterke aanwijzingen zijn dat de nutriëntenstatus van de bodem een grote rol speelt bij opbouw van SOM (zie punt 8 hierboven). We adviseren dan ook bij SOC-monitoringen ook de overige bodemkengetallen routinematig te analyseren. De SOM-meting blijft nodig om een vergelijking met de SOM-resultaten uit 1998 (dataset I) te maken.
14. De huidige routinematige methoden om organische-stof(kwaliteit) te bepalen (zoals SOM, SOC, maar ook totale koolstof (TOC)) zijn alle totaalbepalingen. In totaalbepalingen zullen veranderingen in SOM mogelijk minder snel gedetecteerd worden dan wanneer SOM-fracties worden gemeten. Via nieuwe methoden kunnen die SOM-fracties worden gemeten en daarmee eerder veranderingen in kwaliteit van SOM (en daarmee van C-opslag) signaleren (bijv. Sparling 1992). Methoden als pyrolyse (anäerobe verbranding van SOM waarmee fracties worden verkregen) verdienen nader onderzoek. De landbouwpraktijk, het onderzoek, het beleid en de wetgever zullen met deze nieuwe methoden dan ook eerder effect van van beleids- en managementkeuzes moeten zien.

Literatuur

Baum, C., K.-U. Eckhardt, J. Hahn, M. Weih, I. Dimitriou & P. Leinweber. 2013. Impact of poplar on soil organic matter quality and microbial communities in arable soils. *Plant Soil and Environment* 59, 95 – 100.

Broadbent, F.E. 1953. The soil organic fraction. *Advances in Agronomy* 5, 153 – 183.

Conijn J.G. & J.P. Lesschen. 2015. Soil organic matter in the Netherlands; Quantification of stocks and flows in the top soil. *Plant Research International*, Wageningen, PRI-report 619.

Chang, C.-W., D.A. Laird, M.J. Mausbach & C.R. Hurburgh Jr. 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy - Principal Components Regression Analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 65, 480 – 490.

Howard, P.J.A. & D.M. Howard. 1990. Use of organic carbon and loss-on-ignition to estimate soil organic matter in different soil types and horizons. *Biology and Fertility of Soils* 9, 306 – 310.

ISO 10694. 1995. Soil quality — Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). Available at www.nen.nl (in Dutch).

ISO 13878. 1998. Soil quality — Determination of total nitrogen content by dry combustion ("elemental analysis"). Available at www.iso.org/standard/23117.html.

ISO 17184. 2014. Soil quality — Determination of carbon and nitrogen by near-infrared spectrometry (NIRS). Available at <https://www.nen.nl/en/nen-en-iso-17184-2014-en-195848>

Kirkby, C.A., A.E. Richardson, L.J. Wade, G.D. Batten, C. Blanchard & J.A. Kirkegaard. 2011. Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. *Soil Biology & Biochemistry*, 60, 77 – 86.

Kirkby, C.A., A.E. Richardson, L.J. Wade, J.B. Passioura, G.D. Batten, C. Blanchard & J.A. Kirkegaard. 2014. Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 68 402 – 409.

Klingenuß, C., N. Roßkopf, J. Walter, C. Heller & J. Zeitz. 2014. Soil organic matter to soil organic carbon ratios of peatland soil substrates. *Geoderma* 255, 410 – 417.

Knotters, M., J.A. Reijneveld, D. van Tol-Leenders & J.-P. Lesschen. In prep. An estimation of changes in organic matter contents in Dutch soils.

Lesschen, J.P., T. Vellinga, A. van der Linden & R.L.M. Schils. 2020. Mogelijkheden voor monitoring van CO₂-vastlegging en afbraak van organische stof in de bodem op melkveebedrijven. Wageningen Environmental Research, Report 2993. (In Dutch).

Lunt, H.A. 1931. The carbon-organic matter factor in forest soil humus. *Soil Science* 32, 27 – 33.

Moni, C., A. Chabbi, N. Nunan, C. Rumpel & C. Chenu. 2010. Spatial dependence of organic carbon-metal relationships. A multi-scale statistical analysis, from horizon to field. *Geoderma* 158, 120 – 127.

NEN 5753. 2014. Soil - Determination of clay content and particle size distribution in soil and sediment by sieve and pipet. Available at www.nen.nl (In Dutch).

NEN 5754. 2014. Soil – Soil organic matter by loss of ignition. Available at www.nen.nl (In Dutch).

NEN 5768. 1992. Soil - Sample preparation of soil for the determination of elements by atomic spectrometry - Destruction with nitric acid and sulfuric acid. Available at www.nen.nl (in Dutch).

NEN 5776. 2006. Soil - Determination of iron, aluminium and phosphorus in an ammonium oxalate-oxalic acid extract for estimation of the saturation with phosphate. Available at www.nen.nl (in Dutch).

NEN 6966. 2005. Environment - Analyses of selected elements in water, eluates and destruates - Atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma. Available at www.nen.nl (in Dutch).

NEN 15587-2. 1998. Water quality - Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Available at www.nen.nl (in Dutch).

NEN-EN 15936. 2012. Sludge, treated biowaste, soil and waste - Determination of total organic carbon by dry combustion. Available at www.nen.nl (in Dutch).

NEN-EN 16179. 2012. Sludge, treated biowaste and soil - Guidance for sample pretreatment. Available at www.nen.nl (in Dutch).

Pribyl, D.W. 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 156, 75 – 83.

Pronk, A., P. van Leeuwen & H. van den Berg. 2012. Organische stof management in de sierteelt met speciale aandacht voor (duin)zandgronden; Resultaten 2007-2011. Plant Research International (WUR), PRI-report 438 (In Dutch).

Read, J.W. & R.H. Ridgell. 1922. On the use of the conventional carbon factor in estimating soil organic matter. *Soil Science* 13, 1 – 6.

Reijneveld, J.A., G.W. Abbink, A.J. Termorshuizen & O. Oenema. 2014. Relationships between soil fertility, herbage quality and manure composition on grassland-based dairy farms. *European Journal of Agronomy* 56, 9 – 18.

Reijneveld, J.A., P.A.I. Ehler, A.J. Termorshuizen & O. Oenema. 2010. Changes in the soil phosphorus status of agricultural land in the Netherlands during the 20th century. *Soil Use and Management* 26, 399 – 411.

Reijneveld, J.A., J. van Wensem & O. Oenema. 2009. Soil organic carbon contents of agricultural land in the Netherlands between 1984 and 2004. *Geoderma* 152, 231 – 238.

Reijneveld, J.A., M. van Oostrum, K. Brolsma & O. Oenema. In prep. Implementing 0.01 M CaCl₂ extractions and NIRS to empower innovations in routine soil testing.

Rosell, R.A., J.C. Casparoni & J.A. Galantini. 2001. Soil organic matter evaluation. Pp. 311 – 322. In: Lal, R., J.M. Kimble, R.F. Follet & B.A. Stewart (Eds). *Assessment methods for soil carbon*. Advances in Soil Sciences, CRC Press, Boca Raton, Boston.

Soon Y.K. & S. Abboud. 1991. A comparison of some methods for organic carbon determination. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 2, 943 – 954.

Sleutel, S., S. De Neve, B. Singier & G. Hofman. 2007. Quantification of organic carbon in soils: a comparison of methodologies and assessment of carbon content of organic matter. *Communications in Soil Science and Plant Analyses* 38, 2647 – 2657.

Sparling, G.P. 1992. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research* 30, 195 – 207.

Tipping, E., C.J. Somerville & J. Luster. 2016. The C:N:P:S stoichiometry of soil organic matter. *Biogeochemistry* 130, 117 – 131.

Van den Elsen, E., D. van Tol-Leenders, K. Teuling, P. Römkens, J. de Haan, G. Korthals & J.A. Reijneveld. 2020. De staat van de Nederlandse landbouwbodems in 2018; Op basis van beschikbare landsdekkende dataset (CC-NL) en bodem-indicatorenlijst (BLN). Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3048.

Van Tol-Leenders, D., M. Knotters, W. de Groot, P. Gerritsen, J.A. Reijneveld, F. van Egmond, H. Wösten & P. Kuikman. 2019. Carbon content of soils in the Netherlands (1998 – 2018); CC-NL. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 2974. (In Dutch).

Willers, C., P.J. Jansen van Rensburg & S. Claassens. 2015. Phospholipid fatty acid profiling of microbial communities-a review of interpretations and recent applications. *Journal of Applied Microbiology* 119, 1207–1218.

Yeomans, J.C. & J.M. Bremner. 1991. Carbon and nitrogen analysis of soils by automated combustion techniques. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 22, 843 – 850.

Bijlagen

Bijlage I Dataset II

Analysesresultaten van de variatie in SOM:SOC ratio gemeten via klassieke methoden te verklaren met andere bodemkengetallen middels Redundancy Analysis (RDA)

Alle bodemkengetallen zonder TOC, SOM, SOC, TIC, CaCO₃

Total variation is 201462.031, explanatory variables account for 12.7%
(adjusted explained variation is 12.3%)

Summary Table:

Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Eigenvalues	0.1273	0.8727		
Explained variation (cumulative)	12.73	100.00		
Pseudo-canonical correlation	0.3567	0.0000		
Explained fitted variation (cumulative)		100.00		

Analysis 'SOM:SOC'

Forward Selection Results:

Name	Explains %	Contribution %	pseudo-F	P
Klei%	3.3	20.4	78.7	0.002
pH-CaCl ₂	3.5	21.4	85.5	0.002
P-Al	1.1	7.0	28.2	0.002
Na-CEC	1.5	9.1	37.6	0.002
Fungi/Bacteria	0.6	3.6	15.0	0.002
Silt	0.6	3.4	14.3	0.002
M50 (median sand)	0.3	2.0	8.4	0.008
Al-ox	0.3	2.1	8.7	0.006
P-ox	0.4	2.7	11.3	0.002

Bijlage II Dataset III

Analyseresultaten van de variatie in SOM:SOC ratio gemeten via klassieke methoden te verklaren met andere bodemkengetallen middels Redundancy Analysis (RDA)

Analysis 'SOC SOM Data set II'

Total variation is 184493.871, explanatory variables account for 72.3%
(adjusted explained variation is 72.2%)

Summary Table:

Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Eigenvalues	0.7231	0.2769		
Explained variation (cumulative)	72.31	100.00		
Pseudo-canonical correlation	0.8504	0.0000		
Explained fitted variation (cumulative)	100.00			

Analysis 'Analysis 1'

Forward Selection Results:

Name	Explains %	Contribution %	pseudo-F	P
pH-CaCl ₂	44.9	49.9	1930	0.002
Klei	7.0	7.7	342	0.002
SOC	18.8	20.9	1519	0.002
Fe-ox	0.5	0.5	37.6	0.002
Zand%	0.8	0.9	65.5	0.002
TIC	0.3	0.4	27.8	0.002
Al-ox	<0.1	<0.1	2.9	0.09