
Koolstof in bosbodems

Metingen 2020

Anjo de Jong¹, Bas van Delft¹, Kees Hendriks¹

¹ Wageningen Environmental Research

Dit onderzoek is gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit (project nummer BO-43.10-005-014).

Hier komt een disclaimer

© 2021 Wageningen Environmental Research (an institute under the auspices of the Stichting Wageningen Research), P.O. Box 47, 6700 AA Wageningen, The Netherlands, T +31 (0)317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is part of Wageningen University & Research.

- Acquisition, duplication and transmission of this publication is permitted with clear acknowledgement of the source.
- Acquisition, duplication and transmission is not permitted for commercial purposes and/or monetary gain.
- Acquisition, duplication and transmission is not permitted of any parts of this publication for which the copyrights clearly rest with other parties and/or are reserved.

Wageningen Environmental Research assumes no liability for any losses resulting from the use of the research results or recommendations in this report.

Photo cover: XXXX

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
	1.1 Aanleiding	6
	1.2 Doelstelling	7
2	Achtergrond en methode	8
	2.1 Factoren van invloed op bodemkoolstof in bos	8
	2.2 Beknopte literatuurverkenning van bodem koolstofvoorraden	10
	2.3 Selectie van meetpunten	15
	2.4 Beschrijving en bemonstering locaties	16
	2.4.1 Methode beschrijving van bodem- en humusprofiel	16
	2.4.2 Methode beschrijving van het pH-profiel	19
	2.4.3 Bemonstering	20
	2.5 Analyse	21
	2.5.1 Lab-analyses	21
	2.5.2 Berekening van voorraden	21
3	Resultaten	23
	3.1 Locatie- en profielbeschrijvingen	23
	3.1.1 Strata	24
	3.1.2 Boomsoort	24
	3.1.3 Bodem en Vocht	25
	3.2 Dikte van de strooisellagen	25
	3.3 Koolstofgehalten	27
	3.4 Koolstofvoorraden	28
	3.5 Stikstof	30
	3.6 Fosfor	32
	Literatuur	35
	Annex 1 Overzicht van bemonsteringsmethode en opstandskennmerken van de gebruikte literatuur	37

Samenvatting

Voor de bossen op de (arme) zandgronden is de opbouw van het humusprofiel samen met de bovenste lagen van de minerale bodem een belangrijke sink voor koolstof. Daarnaast levert het humusprofiel een belangrijke bijdrage aan mineralen en de vochtvoorziening voor de vegetatie. Op dit moment ontbreekt goede informatie over de profielbouw, kwaliteit en diktes van de strooisellaag onder bos met verschillende begroeiingen. De opgeslagen hoeveelheden zijn afhankelijk van het bodemtype, de boomsoort en het beheer. De accumulatie is het grootst in de bossen op de armere zandgronden, (de veenbodems buiten beschouwing gelaten).

Doel van dit project is voor de belangrijkste Nederlandse boomsoorten op arme zandgronden betrouwbare gegevens over de voorraden koolstof in bodem en strooisel te krijgen. In 2020 ligt hierbij de focus op eik, berk, grove den en Douglas op de armere zandgronden. Daarnaast zal dit project bijdragen aan een betere methode om de strooiselmetingen in de NBI om te zetten in de geschatte hoeveelheid koolstof ten behoeve van de LULUCF-rapportage.

Het project wordt voortgezet in 2021 om aanvullende bemonsteringen te doen voor extra boomsoorten en ook kleigronden. Deze rapportage kan dan ook gezien worden als voortgangsrapportage, die na bemonstering in 2021 wordt aangevuld.

Er zijn in 2020 bemonsteringen uitgevoerd op 143 punten van de NBI. Op basis van een literatuurstudie en de verdeling van het voorkomen van boomsoorten in Nederland volgens de NBI zijn de punten verdeeld over verschillende groeiplaatsen, en verspreid over het land.

Van de meetpunten is een beschrijving gemaakt van boomlaag, struiklaag, vegetatie en humusprofiel. De gegevens hiervan worden in een aparte rapportage opgenomen. Er zijn monsters genomen van 4 bodemlagen:

- De LF-laag, dit is het bovenste deel van de humuslaag, met de L-laag met de nog herkenbare plantendelen en de F-laag waarin de plantendelen zijn verkleind (gefragmenteerd);
- De H-laag, waarin organisch materiaal (vrijwel) volledig is gehumificeerd;
- 0 - 30 cm minerale bodem (hier A-laag genoemd);
- 30 - 100 cm minerale bodem (hier C-laag genoemd).

Van de LF en de H lagen zijn de diktes en volumes in het veld bepaald en zijn drooggewichten per volume gemeten. Van alle monsters zijn koolstof en stikstofgehalten bepaald en van de minerale bovengrond ook fosfor.

De dikte van de strooisellagen bedraagt voor de vier hoofdboomsoorten gemiddeld 4,4 cm voor de LF-laag en 2,4 cm voor de H-laag. De naaldboomsoorten grove den en Douglas hebben een duidelijk dikkere LF-laag dan eik en berk. De verschillen tussen de bodemtypen zijn minder duidelijk. Gemiddeld hebben de vaaggronden een dikkere LF-laag en een dunnere H-laag. In het algemeen lijken de diktes van de LF-laag te zijn afgenomen ten opzichte van 1990, terwijl die van de H-laag is toegenomen. Dit kan duiden op een snellere strooiselomzetting, maar de leeftijd van de bosgroeiplaats zal ook een rol spelen.

De koolstofgehalten verschillen duidelijk tussen de bodemlagen. De C-gehalten in de LF-laag zijn met 383 g/kg het hoogst. In de H-laag zijn de C-gehalten duidelijk lager (271 g/kg). In de minerale bovengrond (0-30 cm) bedragen de C-gehalten gemiddeld 24 g/kg en in de minerale ondergrond (30-100 cm) zijn betrekkelijk klein (8 g/kg).

De totale koolstofvoorraden in de bodem tot 100 cm – mv. en de strooisellaag bedragen gemiddeld voor de vier boomsoorten 207 ton C/ha. Het grootste deel daarvan, 90 ton C/ha zit in de minerale

bovengrond, terwijl 77 ton C/ha in de minerale ondergrond zit. De gezamenlijke voorraad in de humuslaag is gemiddeld 40 ton C/ha, waarvan 23 in de FL en 17 in de H-laag. Het verschil in totale voorraden is betrekkelijk klein tussen de boomsoorten, maar zijn bij Douglasspar het grootst.

Humuspodzolgronden hebben duidelijk grotere C-voorraden (237 ton C ha⁻¹) dan de andere twee bodemtypen (ca. 165 ton C ha⁻¹), wat een direct gevolg is van de hogere C-gehalten in de minerale bovengrond en minerale ondergrond.

De stikstofvoorraden bedragen gemiddeld 9.398 kg N/ha. De C/N waarden liggen gemiddeld iets boven 20, maar lager voor de minerale ondergrond. De verdeling van stikstof in de bodem volgt dan ook in grote lijnen die van koolstof.

De geschatte P-voorraad in minerale bovengrond (0 - 30 cm) bedraagt gemiddeld 562 kg/ha, en de mediaan is 353 kg/ha. Bij eik is deze voorraad duidelijk hoger dan bij de andere boomsoorten, namelijk 887 kg/ha. De mediane waarde voor P₂O₅ is 18 mg/100g. Een waarde van 20 is voor veel boomsoorten laag (40 - 60 is gewenst), en ook voor weinig eisende soorten (grove den) is dit al aan de lage kant. Meer dan 50% van de gemeten locaties heeft dus een lage waarde.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Voor de bossen op de (arme) zandgronden is de opbouw van het humusprofiel samen met de bovenste lagen van de minerale bodem een belangrijke sink voor koolstof. Daarnaast levert het humusprofiel een belangrijke bijdrage aan mineralen en de vochtvoorziening voor de vegetatie. Op dit moment ontbreekt goede informatie over de profielbouw, kwaliteit en diktes van de strooisellaag onder bos met verschillende begroeiingen. De opgeslagen hoeveelheden zijn afhankelijk van het bodemtype, de boomsoort en het beheer. De accumulatie is het grootst in de bossen op de armere zandgronden, (de veenbodems buiten beschouwing gelaten).

In het project Landelijke Steekproef Kaartbladen (LSK) zijn in 1996 koolstofbepalingen van bodems gedaan, gestratificeerd naar bodemtype en grondwatertrappen. De gegevens hieruit zijn gebruikt om standaard bodem koolstof voorraden op te stellen per bodemtype en landgebruik, voor gebruik in de LULUCF rapportages. In 2018-2019 zijn deze punten opnieuw bemonsterd en de C-voorraad bepaald in project CC-NL uit de klimaatenvelophe Slim Landgebruik. Uit deze heropname blijkt geen significante verandering aantoonbaar in de hoeveelheid koolstof in de bodem onder een bepaald landgebruik (met uitzondering van een afname van veengronden). Dit wordt onder andere beïnvloed door het relatief lage aantal steekproefpunten, en doordat de exacte locatie van de steekproefpunten niet altijd teruggevonden kon worden. Specifiek voor bos geldt verder dat er op de steekproefpunten geen extra informatie verzameld is die gebruikt kan worden om patronen te verklaren, zoals aanwezige boomsoorten en sporen van beheersingrepen (kap en/of bodembewerking). Ook is er geen bemonstering van de strooisellaag geweest zodat de onderlinge samenhang tussen boomsoort, beheer, strooisel en bodem koolstof niet bestudeerd kan worden.

Voor de LULUCF rapportages is het verplicht om te rapporteren over de hoeveelheid koolstof in strooisel, en hoe dit verandert in de tijd. Voor de situatie in 1990, het begin van de rapportagereeks, wordt gebruik gemaakt van een viertal datasets van studies uit die tijd. Tijdens de looptijd van het Meetnet Functievervulling (MFV), de voorloper van de Zesde Nationale Bosinventarisatie (NBI-6), is aan het protocol toegevoegd dat de dikte van de strooisellaag gemeten wordt. Zodoende is voor ongeveer de helft van de MFV punten een dikte van de strooisellaag gemeten, in 2004 en 2005. Tijdens de NBI-6 (2012-2013) is op alle punten de dikte van de strooisellaag gemeten. In de NBI-7 (2017-2021) wordt de dikte op 3 punten gemeten, in plaats van een enkele meting in eerdere inventarisaties. De gemeten diktes van de strooisellaag worden omgezet in schattingen van de hoeveelheid koolstof, gebaseerd op relaties die afgeleid zijn uit de studies rond 1990 en een kleinere studie uit 2008 van Schulp et al. Documentatie van de onderliggende methodes is aanwezig, maar nooit gepubliceerd. Het is niet bekend hoe betrouwbaar deze methode is, en of de relaties uit 1990 nog steeds geldig zijn. Veiligheidshalve wordt koolstof in strooisel nu niet opgevoerd als koolstofsink omdat de onzekerheid in de cijfers te groot geacht wordt om goed te kunnen rapporteren. Als maatregelen zoals voorgesteld in de klimaatenveloppes effect hebben op koolstof in het strooisel, zal dat door het huidige LULUCF systeem dus niet worden geregistreerd. Daarom met dit projectvoorstel een slag maken tot betere relaties die in LULUCF doorwerken.

Schulp et al. (2008) hebben voor enkele boomsoorten op rijkere zandgronden koolstofvoorraden van de bodem en strooisellaag bepaald, waarbij onderscheid tussen beheer en niet-beheer is meegenomen. Dit werk is voortgezet binnen de klimaatenveloppen van 2018 en 2019 specifiek voor beheerde en niet beheerde opstanden van Douglas, Japanse lariks, beuk en grove den (deelpilot B3/2.3). Hiermee is een begin gemaakt met het verkrijgen van beter inzicht in de koolstofvoorraden onder bos voor een aantal specifieke combinaties van boomsoort en bodemtype. Het aantal bemonsterde opstanden is met 1 of 2 echter erg beperkt, terwijl bekend is dat de ruimtelijke variatie groot kan zijn.

1.2 Doelstelling

Om inzicht te krijgen in de voorraad koolstof in bodem en strooisel, en effect van boomsoort en beheer, is een dataset nodig met een systematische bemonstering van bodem, strooisel, boomsoort en beheer op dezelfde plek. Hiervoor lenen de steekproefpunten van de NBI zich het beste, omdat voor de meeste NBI-punten de opstand al langere tijd gevolgd wordt wat betreft de boomsoorten, houtvoorraden en bijgroei en mortaliteit. Bovendien liggen deze punten aan de basis van de LULUCF-rapportage.

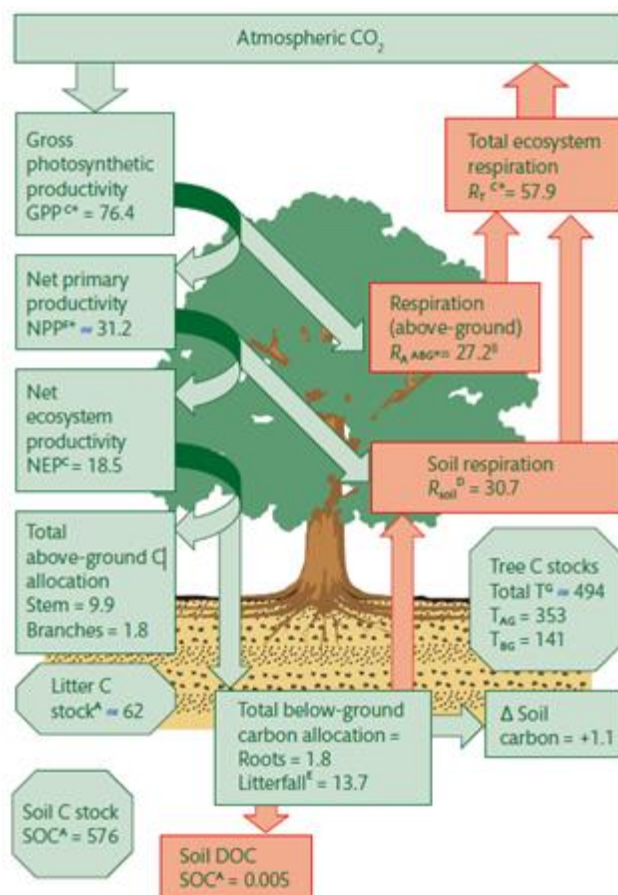
Het totale meetnet van de NBI bedraagt 3600 plots, deze liggen verspreid over het land bij circa 1200 verschillende boseigenaren. Uit budgettaire overwegingen en gezien de logistieke uitdaging (toestemming, bereikbaarheid, beschikbaarheid van informatie) wordt ervoor gekozen om in het project van 2020 alleen plots te selecteren die bij een aantal grote terreinbeherende organisaties liggen.

In 2020 is voor 143 punten van de NBI een bemonstering gedaan voor de hoeveelheid koolstof in bodem en strooisel. Hierbij is een beschrijving gemaakt van de bodem en humusprofielen. Er zijn monsters verzameld van de lagen (L+F, H, 0-30 en 30-100 cm), conform de werkwijze die is gehanteerd door Schulp et al (2008) en Schelhaas et al. (2020), maar voor de koolstofbepaling van de minerale bodem aan te sluiten bij het CC-NL project. Ook zijn bepalingen gedaan om de N, en P gehalten te bepalen.

2 Achtergrond en methode

2.1 Factoren van invloed op bodemkoolstof in bos

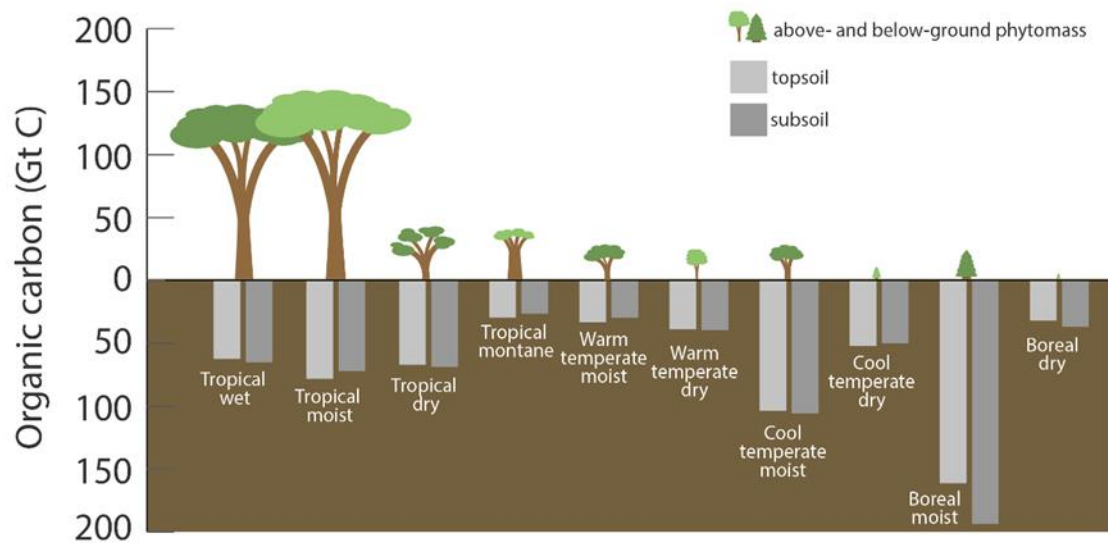
Bos levert een belangrijke bijdrage aan klimaatmitigatie door het vastleggen van koolstof in het bosesysteem. Bomen (en planten) nemen koolstof in de vorm van CO_2 op uit de lucht en leggen die als biomassa vast in bladeren, takken, stammen en wortels. Afstervende biomassa is de belangrijkste bron van koolstof voor bosbodems. Afgewallen bladeren, naalden, takken, stammen, zaden en vruchtomhulsels en afgestorven wortels verteren en worden omgezet in organische stof die zich mengt met de minerale bodem. Die menging met de minerale bodem kan snel of langzaam gaan afhankelijk van de standplaatsfactoren. Organische stof is belangrijk voor het ecosysteem omdat het vocht kan vasthouden en belangrijke voedingsstoffen bevat. De organische stof in de bodem wordt ook afgebroken waarbij bodemfauna en schimmels een belangrijke rol spelen. Het afbraakproces wordt mineralisatie genoemd en hierbij komen belangrijke voedingsstoffen voor de bomen beschikbaar. De organische stof in de bodem bestaat voor ca. de helft uit koolstof. Bij de mineralisatie van organische stof komt CO_2 vrij (respiratie) wat weer in de atmosfeer wordt opgenomen. De snelheid van aanvoer en afbraak van organische stof bepalen of de koolstofvoorraad stof in de bodem toeneemt, dan wel afneemt (figuur 1).



Figuur 1 Koolstof stromen en voorraden (beide in $\text{ton CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$) in een 70-80 jarig eiken bos in het Verenigd Koninkrijk (Morison et al., 2012)

Standplaatsfactoren zijn van grote invloed op de opbouw en afbraak van biomassa en organische stof en dus op de bodemkoolstofvoorraad. Klimaat is een belangrijke factor die ook van grote invloed is op de hoeveelheid koolstof die boven en ondergronds wordt opgeslagen in bosesystemen. Er zijn grote

verschillen tussen boven- en ondergrondse opslag van koolstof in bossen van verschillende klimaatzones (figuur 2).



Figuur 2 Verschillen in totale boven- en ondergrondse koolstofvoorraden in bossen van verschillende klimaatzones (Janowiak et al., 2017)

Over het algemeen kan gezegd worden dat naast klimaat, bodem (inclusief grondwater), boomsoort en beheer van grote invloed zijn op de boven- en ondergrondse verdeling van koolstof en de opbouw- en afbraaksnelheid.

Klimaat

In Nederland zijn geen grote klimaatverschillen die echt grote verschillen in koolstof opbouw in bos teweegbrengen. Wel is er een temperatuurgadiënt van zuid naar noord Nederland die ook een oplopend organisch stofgehalte in bodems in noordelijke richting laat zien (Hanegraaf et al., 2009). Gegevens van Van den Burg (1999) laten zien dat dit ook voor het organische stofgehalte in bosbodem geldt. Zo wordt voor het veelvoorkomende bodemtype veldpodzol voor het zuidoostelijk bosgebied een organisch stof gehalte gerapporteerd van 4,08% en voor het noordoostelijk bosgebied van 6,06%.

Bodem

Op voedselarme gronden breekt organische stof minder goed af dan op voedselrijke gronden. Bij de humusvormen is onderscheid te maken in mull, moder en mor. In het mull-systeem wordt de nutriëntenvoorziening vooral bepaald door de voedselrijkdom in de minerale ondergrond; de humuslaag wordt snel omgezet. In het mor-systeem is de minerale ondergrond voedselarm. De strooisellaag breekt langzaam af en koolstof en nutriënten accumuleren daarin. Het moder-systeem zit tussen het mull en mor-systeem in (De Jong et al., 2015). Het organisch-stofgehalte hangt ook samen met het leemgehalte van zandgronden. Leemrijke zandgronden hebben doorgaans een hoger organisch stofgehalte dan leemarme zandgronden (Van den Burg, 1999).

Grondwaterstand

Bij de afbraak van organische stof is de aanwezigheid van voldoende zuurstof van belang. Op natte gronden in de bodem kan zuurstoftekort de afbraak remmen waardoor de afbraak van organische stof wordt geremd en deze ophoopt wat tot moerige gronden kan leiden. Elzenbroekbossen zijn daar een voorbeeld van. Over het algemeen kan gezegd worden dat het organische-stofgehalte toeneemt naarmate de grondwaterstand hoger is en de grondwatertrap lager. Van den Burg (1999) geeft een gemiddeld organisch-stofgehalte voor bosbodems met grondwater trap VII van 3,88% en voor grondwatertrap II een gemiddeld organisch stofgehalte van 9,86%.

Boomsoort

Bomen vormen via afvallende takken, bladeren of naalden en afgestorven wortels een belangrijke aanvoer van organische stof en daarmee koolstof in de bodem. Niet alle bladeren of naalden verteren even snel. Strooisel van eik, beuk en naaldbomen is over het algemeen slechter afbreekbaar dan strooisel van es, els, iep, linde, esdoorn, en wilg. Lariksstrooisel breekt over het algemeen zeer slecht af met een afbraaksnelheid van meer dan 4 jaar (De Jong et al., 2015).

Beheer

Naast boomsoortenkeuze heeft het beheer ook invloed via andere maatregelen op de opbouw van organische stof in de bodem. Dunning en oogst leidt tot een hogere mineralisatie vanwege beroering van de bodem en het strooisel en een hogere lichtinval op de bodem en vanwege (tijdelijk) minder strooiselinput (Van den Burg et al., 1987). Indien de bodem bij aanleg wordt bewerkt leidt dit tot afname van organische stof die nog lang kan doorwerken. Veel bossen die aangelegd zijn op vroegere heidegronden hebben een startbemesting gekregen of er is landbouwvoorbouw geweest. De effecten op de organische stof na 60 jaar waren echter niet eenduidig.

Leeftijd

Ook leeftijd kan een rol spelen in het organisch stofgehalte van bossen alhoewel ook de invloed van leeftijd niet altijd eenduidig is. Ouder opstanden produceren meer blad- en naaldmassa en dus strooisel dan jonger opstanden, met een culminatiepunt rond 60 jaar of ouder. Hierna neemt de productie van strooisel weer af. Van de andere kant hebben oudere opstanden vaak een opener kronendak waardoor er meer licht op de bodem valt en de mineralisatie hoger is. Oudere opstanden hebben een langere periode gehad waarin de strooisellaag zich kan opbouwen. Echter de voorgeschiedenis van een opstand speelt echter ook een belangrijke rol.

2.2 Beknopte literatuurverkenning van bodem koolstofvoorraden

Om een indruk te krijgen van de koolstofvoorraad in de strooisellaag en minerale bodem van bos in Nederland is een beknopte literatuurverkenning uitgevoerd. Hierbij is de volgende literatuur geraadpleegd Van den Burg (1999), Van den Burg, Schoenfeld en Oude Voshaar (1987), De Vries en Leeters (2001) en Schulp (2009). De onderzoeken verschillen onderling enigszins in onderzoeksoptzet en bemonsteringsmethode waardoor de resultaten niet volledig een op een zijn te vergelijken. Qua orde van grote geven de koolstofvoorraden wel inzicht in de omvang ervan voor verschillende bodemtypen, boomsoorten, leeftijden en beheer. In annex 1 is voor de verschillende onderzoeken een overzicht gegeven van de opstandsgegevens en methode van bemonstering.

Van den Burg (1999) heeft de chemische eigenschappen van het bosbodembkundig onderzoek van het bosbouw onderzoeksinstituut 'De Dorsschkamp' gebundeld en gepubliceerd. Hij geeft hierin een overzicht van de belangrijkste bodemchemische karakteristieken van bosbodems met gemiddelden voor het gehele Nederlandse bos, maar ook voor de verschillende bosregio's en voor de verschillende bodemtypen en grondwatertrappen. Hier worden een aantal voor dit onderzoek relevante resultaten gepresenteerd. De getallen zijn geen representatieve steekproef van de bosgronden in Nederland, maar geven een beeld van de geanalyseerde grondmonsters. De arme zandgronden, waar het meeste bos op voorkomt, zijn in de monsters oververtegenwoordigd omdat veel van het onderzoek op die groeiplaatsen gericht was.

Over alle bosgronden genomen is het landelijk gemiddelde van de organische stof in de laag 0-25 cm 4,84% (n=9032), met een minimum van 0,10% en een maximum van 91,90% (Van den Burg 1999). De lage gehalten zijn aangetroffen in stuifzanden, de hoge gehalten in veengronden.

Veel bos in Nederland komt voor op veldpodzolgronden, haarpodzolgronden en holtpodzolgronden. In tabel 1 zijn de organische stofgehalten van deze bodemtypen gegeven.

Tabel 1 Organisch stofgehalte (%) in de laag 0-25 cm van veel voorkomende bodemtypen in het Nederlandse bos (Van den Burg 1999).

Bodemtype (code)	n	minimum	gemiddelde	maximum	s.d.
Veldpodzol (Hn)	2000	1,00	4,95	28,00	1,95
Haarpodzol (Hd)	903	1,00	4,83	13,70	1,60
Holtpodzol (Y)	1420	0,50	3,86	12,90	1,44
Duinvaaggronden (Zd)	309	0,23	2,12	8,10	1,44
Vlakvaaggronden (Zn)	412	0,10	2,30	18,34	2,09

De humuspodzolgronden (veldpodzol- en haarpodzolgrond) hebben met bijna 5% het hoogste organische stofgehalte van deze gronden. Het iets hogere organische stofgehalte van veldpodzolgronden ten opzichte van de haarpodzolgronden hangt waarschijnlijk samen met de (oorspronkelijk) hogere grondwaterstanden van de veldpodzolgronden wat een lagere mineralisatie van organische stof veroorzaakt. Holtpodzolgronden hebben gemiddeld 1% minder organische stof in de laag 0-25 cm dan veld- en haarpodzolgronden. Kijkend naar het minimum en maximum kunnen de verschillen met haarpodzolgronden echter klein zijn. Ten opzichte van veldpodzolgronden is het gevonden maximum organische stofgehalte in holtpodzolgronden lager. Holtpodzolgronden komen vrijwel altijd op (oorspronkelijk) drogere gronden voor dan veldpodzolgronden. Het belangrijkste verschil tussen de humuspodzolgronden en moderpodzolgronden (o.a. holtpodzolgronden) ligt in de kwaliteit van de humus die samenhangt met de wat rijkere minerale gronden waarin holtpodzolgronden zich ontwikkelen. Het organische stof gehalte voor de bodemtypen varieert voor de verschillende bosregio's (tabel 2).

Tabel 2 Organisch stofgehalte (%) van veel voorkomende bodemtypen op zandgronden per bosgebied (Van den Burg 1999)

Bodemtype	Bosgebied in Nederland						Gemiddeld
	Noordoost	Oost	Centraal oost	Centraal west	Zuidoost	Zuidwest	
Veldpodzolgrond	6,06	5,05	4,43	4,18	4,08	4,76	4,95
Haarpodzolgrond	5,57	5,30	4,87	4,40	4,00	4,43	4,83
Holtpodzolgrond	4,95	4,14	3,96	4,06	2,54	5,02	3,86
Duinvaaggrond	2,88	2,52	1,34	3,86	2,74	3,83	2,12
Vlakvaaggronden	6,76	2,46	1,85	4,73	1,93	3,18	2,30

De Vries en Leeters (2001) deden onderzoek naar de chemische samenstelling van de humuslaag en de minerale bodem van 150 bosopstanden in Nederland. Zij vonden een gemiddelde dikte voor de strooisellaag van 8,3 cm met een pool van gemiddeld 95 ton strooisel of 66 ton organische stof per ha. Van den Burg en Schoenfeld (1988) geven aan dat in Nederland in de meeste bosopstanden de opbouw van de humuslaag accumuleert tot ca. 80-100 ton per ha.

De strooisel pool varieert voor de verschillende humuslagen die worden onderscheiden. Zo vond de Vries en Leeters (2001) een pool van gemiddeld 82 ton strooisel voor de LF laag, 36 ton per ha voor de H laag. In bossen waar de verschillende humus lagen niet afzonderlijk konden worden onderscheiden werd 83 ton per ha gevonden voor de LFH laag.

Verder vonden De Vries en Leeters (2001) een verschil in strooisel pool en organische stof voor verschillende boomsoorten (tabel 3). Bij de loofboomsoorten eik en beuk was de strooisel pool hoger dan bij de naaldboomsoorten. Bij de naaldboomsoorten werd voor grove den de hoogste pool gevonden die vergelijkbaar was met die van zomereik.

Tabel 3 Strooisel pool, dichtheid en organische stofgehalte van de strooisellaag voor veel voorkomende boomsoorten in het Nederlandse bos (De Vries en Leeters 2001)

Boomsoort	Aantal (n)	Strooisel pool (ton ha ⁻¹)	Dichtheid (kg m ⁻³)	Organisch stofgehalte (g kg ⁻¹)
Grove den	44	101	130	673
Oostenrijkse en Corsicaanse den	15	66	111	654
Douglaspasp	15	81	111	653
Fijnspar	15	92	130	695
Japanse lariks	16	98	85	796
Zomereik	30	102	131	577
Beuk	15	108	153	631

Het koolstofgehalte van de organische stof in de humuslaag in bos werd door De Vries en Leeters (2001) bepaald op 0,579. Het koolstofgehalte van de organische stof in de humus laag varieert slechts weinig voor de verschillende boomsoorten (tabel 4). Dennen hebben een lager C-gehalte in de organische stof in de strooisel laag dan fijnspar, Douglaspasp en de loofboomsoorten eik en beuk. De mediaan van de koolstofvoorraad in de organische stof van de humuslaag bedraagt 36,8 ton C ha⁻¹. Lesschen et al. (2012) rapporteert een gemiddelde koolstofvoorraad voor bos in Nederland van 31,5 ton C ha⁻¹. Van Den Burg et al. (1987) geven aan dat de opbouw van de strooisellaag stagneert bij een waarde van ca. 80-100 ton C ha⁻¹. De door De Vries en Leeters (2001) gerapporteerde waarden vallen in de ranges aangegeven door van den Burg et al. (1987) en Lesschen et al. (2012).

Tabel 4 Strooisel voorraad, koolstof stofgehalte en koolstof voorraad in strooisel voor veel voorkomende boomsoorten in het Nederlandse bos (De Vries en Leeters 2001)

Boomsoort	Aantal (n)	Strooisel voorraad (ton ha ⁻¹)	C gehalte (g kg ⁻¹)	C voorraad (ton ha ⁻¹)
Grove den	44	101	577	37,984
Oostenrijkse en Corsicaanse den	15	66	557	22,718
Douglaspasp	15	81	580	34,028
Fijnspar	15	92	583	36,207
Japanse lariks	16	98	567	40,359
Zomereik	30	102	580	36,122
Beuk	15	108	588	40,829

In de minerale bodem (laag 0-30 cm) bedraagt de mediaan van de organische stof 38 g kg⁻¹ voor de onderzochte bosopstanden van De Vries en Leeters. Het gemiddelde koolstofgehalte van de organische stof in de minerale bodem bedroeg 0,425 g kg⁻¹, 0,154 g kg⁻¹ of 27% lager dan het koolstofgehalte van de organische stof in de strooisellaag. De mediaan van de koolstof voorraad in de organische stof van de minerale bodem bedraagt 70,6 ton C ha⁻¹. Tussen de verschillende bodemtypen is het verschil in organische stof gehalte vrij groot (tabel 5). Duin- en vlakvaaggronden hebben de laagste gehalten. Gronden met grondwaterinvloed, veldpodzolgronden, beekeerd- en moerige gronden hebben de hoogste gehalten.

De door De Vries en Leeters (2001) gevonden organische stofgehalten in de minerale bodem zijn lager dan de door Van den Burg (1999) gerapporteerde waarden (tabel 2). De waarden voor de veld- en haarpodzolgronden liggen in dezelfde orde van grootte, maar de waarden voor de holtpodzolgronden, duinvaag- en vlakvaaggronden liggen bij De Vries en Leeters 0,5 tot 1% lager dan bij Van den Burg (1999).

Het verschil in organische stof wordt ook weerspiegelt in het koolstofgehalte van de verschillende bosbodems (tabel 6).

Tabel 5 Organisch stofgehalte, dichtheid en totale organische stof voorraad in de minerale bovengrond (0-30 cm) van veel voorkomende bosbodems in Nederland (De Vries en Leeters, 2001)

Bodemtype	Aantal (n)	Organisch stofgehalte (g kg ⁻¹)	Dichtheid (kg m ⁻³)	Organische stof voorraad (ton ha ⁻¹)
Duin- en vlakvaaggronden	26	16	1541	70
Veld- en haarpodzolgronden	74	45	1345	182
Holtpodzol- en vorstvaaggronden	17	29	1453	126
Enkeerd- en looppodzolgronden	11	35	1404	143
Beekeerd- en moerige gronden	14	56	1300	218
Oude kleigronden	5	41	1336	164

Tabel 6 Organisch stofgehalte, dichtheid en totale organische stof voorraad in de minerale bovengrond (0-30 cm) van veel voorkomende bosbodems in Nederland (De Vries en Leeters, 2001)

Bodemtype	Aantal (n)	Organische stof voorraad (ton ha ⁻¹)	Koolstofgehalte (g kg ⁻¹)	Koolstofvoorraad (ton ha ⁻¹)
Duin- en vlakvaaggronden	26	70	378	26,738
Veld- en haarpodzolgronden	74	182	431	76,483
Holtpodzol- en vorstvaaggronden	17	126	426	57,539
Enkeerd- en looppodzolgronden	11	143	483	69,104
Beekeerd- en moerige gronden	14	218	439	99,048
Oude kleigronden	5	164	458	76,152

Het gemiddelde koolstofgehalte van de organische stof in de minerale bodem werd berekend op 0,425. De koolstofvoorraad in de organische stof van de minerale bodem (laag 0-30 cm) is bijna 2 keer zo hoog dan de koolstofvoorraad in de organische stof van de humuslaag (70,625 vs. 36,833 ton ha⁻¹). Het gemiddelde koolstofgehalte in de humuslaag en de minerale bodem bedraagt gezamenlijk 107,4 ton C ha⁻¹. De door Lesschen et al. (2012) gerapporteerde waarde van het koolstof gehalte in de minerale bodem is met gemiddeld 95,6 ton C ha⁻¹ voor alle bostypen aanzienlijk hoger dan de waarden gevonden door De Vries en Leeters (2001).

Lesschen et al. (2012) hebben een literatuurstudie uitgevoerd naar koolstofgehalten in bodems in bosgebieden. Daarbij is onderscheid gemaakt in vier bostypen: bossen met productiefunctie, vochtige bossen, droge loof of naaldbossen (tabel 7).

De hoogste koolstofvoorraad in de strooisellaag werd gerapporteerd voor droge loofbossen en bedraagt 45 ton C ha⁻¹, 1,3 keer hoger dan voor droge naaldbossen en bijna 1,5 x hoger dan het gemiddelde van alle bostypen. Vochtige bossen hebben met 141 ton C ha⁻¹ de hoogste koolstofvoorraad in de minerale bodem tot 30 cm. In vochtige bossen is de koolstofvoorraad van de minerale bodem 2,5 keer zo hoog dan in droge naaldbossen en 1,5 keer zo hoog dan het gemiddelde voor alle bostypen. Het hogere organische stof gehalten en daarmee de koolstofvoorraad is het gevolg van de hoge grondwaterstand waardoor de humusafbraak wordt vertraagd en er mogelijk ook moerige gronden zijn ontstaan of zelfs veengronden. Of die organische bodems onder bos zijn ontstaan of onder ander vroeger landgebruik is niet bekend.

Tabel 7 Koolstofvoorraden (ton C ha⁻¹) in verschillende boscompartimenten voor verschillende bostypen (Lesschen et al., 2012)

Bostype	Strooisel	Biomassa ondergronds	Bodem (organische stof) (0-30cm)	Bodem + ondergrondse biomassa*)	Strooisel + ondergrondse biomassa + bodem
Bossen met productiefunctie	34	16	83	99	133
Vochtige bossen	12	13	128	141	153
Droge bossen loof	45	10	47	57	102
Droge bossen naald	35	11	74,5	85,5	120,5
Gemiddeld alle bostypen	31,5	12,5	83,125	95,625	127,125

Schulp (2009) onderzocht het effect van de boomsoort en de intensiteit van het bosbeheer op koolstofvoorraden in de bodem (0-10 cm en 10-20 cm) en de strooisellaag in een bos op de Veluwe. Onder loofbos (eik en beuk) was de koolstofvoorraad in zowel de strooisellaag als de minerale bodem lager dan onder naaldboomsoorten (grove den, Douglasspar en lariks) (tabel 8). Dit wijkt af van de koolstofgehalten in strooisel gevonden door De Vries en Leeters (2001) die vonden voor loofboomsoorten hogere of vergelijkbare koolstofgehalten vergeleken met de naaldboomsoorten (tabel 4). Het is niet aannemelijk dat het verschil in bemonsteringsdiepte (Schulp 2009 0-20 cm en De Vries en Leeters 0-30 cm) het verschil volledig verklaart.

Loofboomsoorten lijken een grotere koolstofvoorraad op te bouwen in de minerale bovengrond (0-10 cm) dan in de strooisellaag, terwijl bij naaldboomsoorten het omgekeerde het geval lijkt.

Een leeftijdseffect op de koolstofvoorraad was niet eenduidig. Verwacht werd dat de koolstofvoorraad in de 170 jarige beuk opstand door de langjarige strooiselopbouw hoger zou zijn dan voor de 60 jarige opstanden. Ten opzichte van de 60 jarige beukenopstand was de koolstofvoorraad in zowel de strooisellaag als de minerale bodem hoger. Ten opzichte van de andere 60 jarige boomsoorten was de koolstofvoorraad in de strooisellaag hoger maar in de minerale bodem juist lager. Als naar de totale koolstofvoorraad wordt gekeken, is de koolstofvoorraad van de 170 jarige beukenopstand wel hoger dan van de 60 jarige opstanden, met uitzondering van de lariks opstand. Waarschijnlijk speelt dat de langzame afbraaksnelheid van beukenblad en lariksnaalden een rol bij de hoge koolstofvoorraden in het strooisel en de bodem en heeft dit een groter effect dan leeftijd.

Alhoewel niet significant, lijkt er ook een effect van beheer te zijn op de strooisellaag en daarmee op de koolstofvoorraad daarin. In opstanden zonder recente beheermaatregelen was de koolstofvoorraad in de strooisellaag hoger dan in opstanden waar recente dunningen zijn uitgevoerd. Bij loofboomsoorten nam de koolstofvoorraad relatief meer af door beheermaatregelen dan bij naaldboomsoorten.

Tabel 8 Koolstofvoorraad (ton C ha⁻¹) in de strooisellaag en de minerale bodem voor verschillende boomsoorten en verschil in beheermaatregelen (Schulp, 2009).

Boomsoort (leeftijd in jaar)	Strooisellaag	Minerale bodem				Totaal
	L	F+H	0-10 cm	10-20 cm	0-20 cm	
Beuk (170)	2,57	48,5	43,89	24,83	68,27	119,34
Beuk (60)	1,24	11,06	39,51	13,77	53,28	65,58
Zomereik (60)	1,45	24,62	59,69	21,92	81,61	107,68
Lariks (60)	1,21	29,64	66,42	30,65	97,08	127,93
Douglasspar (60)	1,04	26,33	45,36	17,15	62,51	89,88
Grove den (60)	1,53	26,65	47,4	22,34	69,74	97,92
Gemiddeld	1,51	27,82	50,38	21,7	72,08	101,41
Loofboomsoorten	1,35	17,84	49,6	17,85	67,45	86,64
Naaldboomsoorten	1,26	27,57	53,06	23,38	76,44	105,27
Geen recente beheermaatregelen		26,24	58,55	24,07	82,62	108,86
Recent gedund		21,27	45,82	18,7	64,52	85,79

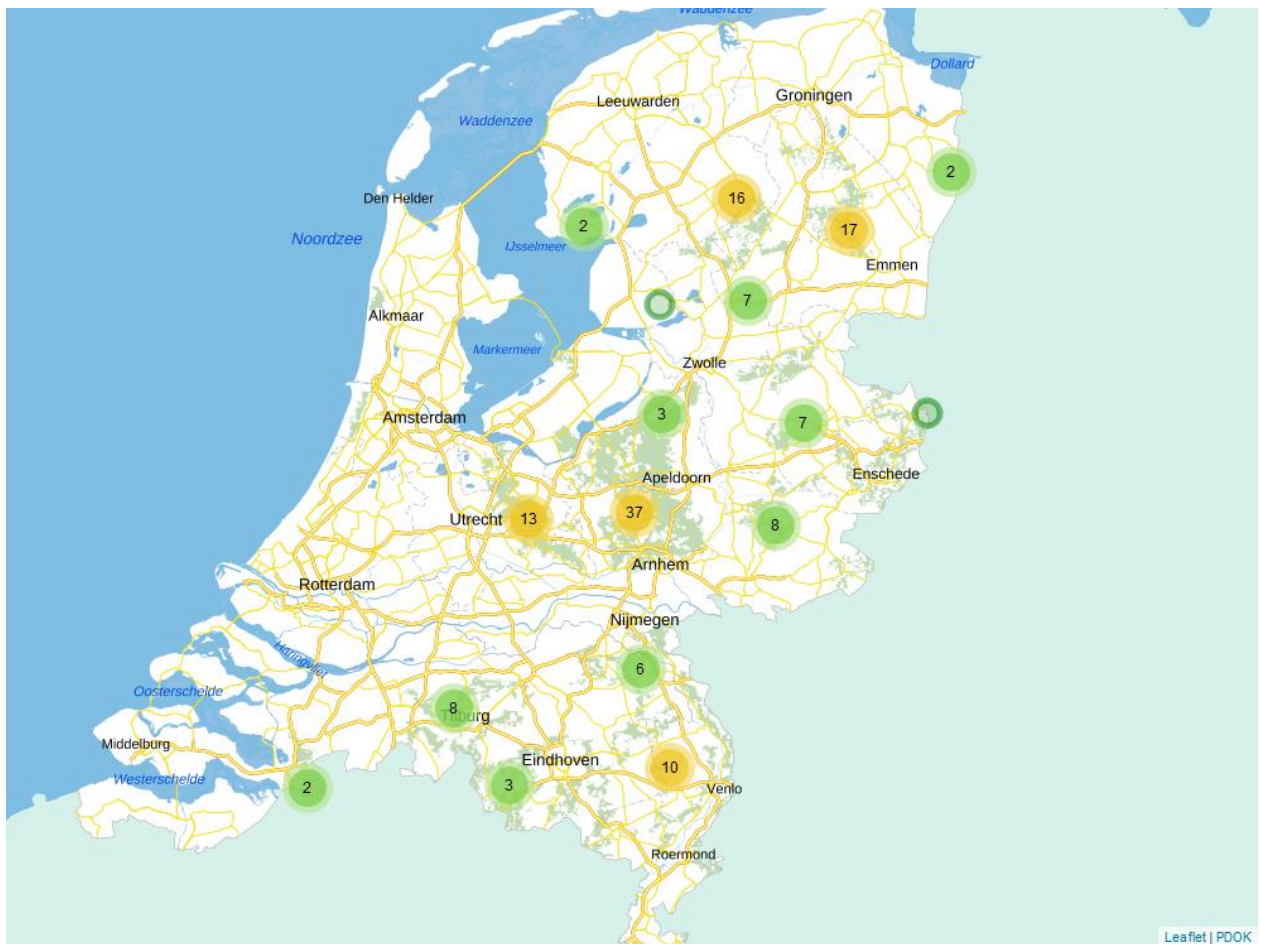
2.3 Selectie van meetpunten

In paragraaf 2.1 en 2.2 zijn factoren aangegeven die van invloed zijn op de C-voorraad in de strooisellaag en de bosbodem. Bij het opzetten van de steekproef is met enkele van deze factoren rekening gehouden.

Op basis van het voorkomen van combinaties van boomsoort, bodem en vochtigheid (volgens de NFI steekproef) is een steekproef van NBI-punten opgezet. De bemonstering is uitgevoerd bij grove den, Douglasspar, zomereik en berk, op humus- en moderpodzolgronden en vaaggronden, waar mogelijk van nat tot droog (tabel 9). De ligging van de bemonsterde locaties is weergegeven in figuur 3.

Tabel 9. Bemonsterde punten (aantal) per combinatie van boomsoort, bodemtype en vochtklasse, zoals vastgelegd in de NFI Database.

	bodemtype						totaal
	Humuspodzolgrond Hn en Hd			Moderpodzolgrond Y	Vaaggronden Zn en Zd		
	Vochtklassen				Vochtklassen		
Boomsoort	Nat	Vochtig	Droog		Vochtig	Droog	
Grove den	6	6	14	10	4	8	48
Douglas		6	11	8		6	31
Eik	8	12	10	10		7	47
Berk	4	3	4	3		3	17
Totaal	18	27	39	31	4	24	143



Figuur 3 Ligging van de locaties in het project 'Bosbodem C'. Een enkele locatie is met een open groene cirkel weergegeven, clusters van meerdere locaties worden met gekleurd rondje en een getal aangeduid.

2.4 Beschrijving en bemonstering locaties

Op de geselecteerde locaties is steeds een bemonstering uitgevoerd en zijn bodem- en humusprofiel beschreven. Aanvullend zijn foto's van de locatie gemaakt (vanuit noord en zuid) en zijn kenmerken genoteerd over de opstand en vegetatie. Daarnaast is bij elke locatie een pH-profiel opgenomen. In deze paragrafen beschrijven wij de gebruikte methodes. In hoofdstuk 3 geven wij een aantal samenvattende resultaten. De profielbeschrijvingen en beschrijvingen van de locaties zijn uitvoeriger beschreven in een aparte rapportage (Dijk en Van Delft 2021). Die rapportage is geautomatiseerd tot stand gekomen door het verwerken van alle gegevens met de R-toepassing 'ProVIVis' (een toepassing om Profielen te Verwerken, Interpretieren en Visualiseren).

2.4.1 Methode beschrijving van bodem- en humusprofiel

Op 143 onderzoekslocaties is met een edelmanboor een boring gemaakt tot ongeveer 1,5 meter diepte (1 - 1,55 meter). Het profiel is beschreven volgens de handleiding voor karteringen (Ten Cate et al., 1995) en opgeslagen in een veldcomputer. Redenen om minder diep te boren kunnen zijn:

- **Droogte**, waardoor zand uit de boor valt;
- **Waternverzadiging**, waardoor de bodem te slap wordt;
- Het voorkomen van grote **stenen** of andere obstakels.



Figuur 4 Het beschrijven van een bodem- en humusprofiel.

In onze benadering is het humusprofiel geen aparte entiteit ten opzichte van het bodemprofiel. Wij beschouwen het humusprofiel als het meer veranderlijke deel van de bodem, waarin bodemvormende processen als humusvorming en uitspoeling een grote rol spelen en ook sterk beïnvloed worden door milieuomstandigheden, vegetatie en beheer. Dat maakt dit deel van de bodem bij uitstek geschikt om de bodemkundige veranderingen door externe factoren als beheer, hydrologie en stikstofdepositie op de standplaats te bestuderen.

De diktes van de humushorizonten verschillen ruimtelijk over een kortere afstand dan de horizonten in het bodemprofiel. Daarom zijn voor het humusprofiel steeds 3 waarnemingen gedaan binnen enkele meters rondom het boorgat. Hier is op deze 3 plekken met de humushapper, een schep (bij harde grond en/of veel stenen), of een mes (slappe veenbodems) een stuk van de bovengrond en het humusprofiel uitgestoken om het humusprofiel te beschrijven (figuur 5). In dit project is steeds de humushapper gebruikt. Hiermee is ook de bemonstering uitgevoerd in de 3 steken (zie § 2.4.3).



Figuur 5 Het steken van een humusprofiel met een humushapper (links), schep (midden), mes (rechts).

De beschrijving van het humusprofiel is uitgevoerd volgens de Veldgids Humusvormen (Van Delft et al., 2006), met enkele uitbreidingen voor nieuw onderscheidde horizonten. De beschrijving van de eerste steek werd opgenomen in de beschrijving van het bodemprofiel, de overige drie steken zijn apart beschreven. Voor de analyse zijn de diktes van de humushorizonten gemiddeld om tot een gemiddeld profiel van de onderzoekslocatie te komen. Dit betreft dan een gecombineerde humus- en bodemprofielbeschrijving. De individuele humusprofielen in de 3 steken worden ook apart gerapporteerd in diagrammen en profielbeschrijvingen in de informatiebladen.



Figuur 6 Voorbeeld van een Turbomull humusprofiel bij locatie 60935.

Aanvullend aan de humushorizonten die beschreven zijn in de Veldgids Humusvormen, hebben wij enkele horizonten beschreven die ontstaan zijn door het wroeten van wilde zwijnen (Megafauna c.f. Veldgids), waarbij de t staat voor 'turbo':

- Ft – F-horizont die sterk beïnvloed is door graafactiviteit van megafauna. Hierdoor komt vaak ook minerale bijmenging voor (Fti);
- Ht – H-horizont die sterk beïnvloed is door graafactiviteit van megafauna. Hierdoor komt vaak ook minerale bijmenging voor (Hti)

- At – A-horizont die sterk beïnvloed is door graaactiviteit van megafauna, de horizont is daarbij deels gehomogeniseerd, maar kan ook enigszins heterogeen zijn.

Een andere humushorizont die niet besproken is in de Veldgids is:

- HA – Overgangshorizont in het bovenste deel van de minerale bodem waar door uitvloeiing van amorfe humus uit de H-horizont een sterk verhoogd organische stofgehalte gevonden wordt (Bijlsma et al. 2020). Deze horizont lijkt op het oog verwant aan een Ah-horizont, maar de laatste is gebonden aan bioturbatie in rijkere bodems met een hogere pH, waarbij de organische stof door bodemfauna (vooral regenwormen) gemengd wordt met de minerale bodem.

Ook voor de humusvormen zijn enkele aanvullende typen onderscheiden:

- LT – Turbomull: Ectorganische horizonten ontbreken, of zijn dunner dan 2 cm, de bovenste minerale horizont is een At-horizont.
- LDXt – Turbomullmoder: Ectorganische horizonten zijn dikker dan 2 cm, maar dunner dan de onderliggende At-horizont.

Waar mull- en mullmoder humusvormen duiden op een actief bodemleven, meestal onder invloed van gunstige standplaatskenmerken (vocht, voedselrijkdom, zuurgraad) hoeft dat bij de turbohumusvormen niet het geval te zijn. De wroetactiviteit is hier de dominante factor bij de profielontwikkeling, waardoor de standplaatsfactoren en strooiselkwaliteit ondergeschikt zijn. Het meest in het oog springt het wroeten door zwijnen, maar lokaal kan ook het graven door konijnen, dassen of vossen of het krabben van herten of reeën aanleiding zijn voor deze humusvormen.

2.4.2 Methode beschrijving van het pH-profiel

In 143 boorpunten is het pH-profiel opgenomen door op ca. 8 (7-9) dieptes de pH van het bodemmateriaal te bepalen met indicatorstrookjes. De aan de bodem gemeten pH is representatief voor de bodemmatrix en daardoor vrijwel niet seizoensafhankelijk, in tegenstelling tot de pH van het bodemwater. De op deze wijze bepaalde pH-waarden komen redelijk overeen met pH-KCl zoals in het laboratorium gemeten wordt, maar liggen wel iets hoger. Ten opzichte van pH-H₂O zijn de waarden in de veldmetingen iets lager. Bij de interpretatie is daarvoor gecompenseerd.



Figuur 7 Veldbepaling van pH met indicatorstrookjes. Deze worden in de grond gestoken waarna de grond nat gemaakt wordt met demi-water.

De pH-profielen geven een indicatie over de zuurbuffer in het moedermateriaal en de mate van uitloging in ondiepere lagen, en bij bodems in het bereik van grondwater over het voorkomen van

kwel in de wortelzone. Of grondwater mogelijk een rol speelt, leiden wij af uit de diepte van de GLG ten opzichte van de kritieke Z-afstand van het bodemprofiel. Dat is de diepte waarover door capillaire opstijging een flux van minimaal 2 mm/dag naar de wortelzone mogelijk is. In dat geval is het mogelijk dat de zuurgraad mede door aanvulling van basen vanuit het grondwater bepaald wordt. In de huidige versie van ProVIVis hanteren wij hiervoor de kritieke Z-afstand die berekend is voor BOFEK2020 (Heinen et al., in prep.).

Voor het bepalen van het pH-profieltype is een sleutel afgeleid waarmee op basis van de pH-waarden op verschillende diepten, de GLG en de kritieke Z-afstand, een inschatting gemaakt wordt van de hydrologische positie, zuurbuffer van het moedermateriaal en mate van verzuring. De 143 boringen waar pH-metingen gedaan zijn, zijn volgens deze sleutel ingedeeld in pH-profieltypen. Bij boringen met een neerslaglens wijst het pH-profiel wel op gebufferd grondwater rond GLG-niveau, maar dit water heeft geen invloed in de wortelzone omdat het verdrongen wordt door infiltrerend neerslagwater. De pH-profielen zijn in de informatiebladen opgenomen als diagram (zie Dijk & Van Delft, 2021).

Tabel 10 Sleutel voor het afleiden van het pH-profieltype uit het verloop van de zuurgraad in verschillende diepteklassen en een vergelijking tussen GLG en kritieke Z-afstand.

GLG < Zk	Maximale pH in dieptetraject			pH-profieltype	
	>20 cm	20 cm - GLG	0 - 20 cm	Code	Omschrijving
Ja	≥ 5,5	≥ 5,5	≥ 5,0	Kw	Kwel-invloed in wortelzone
			< 5,0	Ro	Kwel-invloed aanwezig, ondiepe regenwaterlens
		< 5,5		Rd	Kwel-invloed aanwezig, diepe regenwaterlens
	< 5,5	≥ 5,0		Lo	Mogelijk lokaal kwelwater, of lateraal toegestroomd, zwak gebufferd
			≥ 4,5	InAa	Basenarm infiltratieprofiel
		4,5 - 5,0	< 4,5	InAo	Ondiep verzuurd basenarm infiltratieprofiel
			≥ 4,0	InZ	Zuur infiltratieprofiel
		< 4,5	< 4,0	InZZ	Zeer zuur infiltratieprofiel
Nee		≥ 6,0	≥ 5,0	InBa	Basenrijk infiltratieprofiel
			< 5,0	InBo	Ondiep verzuurd basenrijk infiltratieprofiel
		4,5 - 6,0	≥ 4,5	InAa	Basenarm infiltratieprofiel
			< 4,5	InAo	Ondiep verzuurd basenarm infiltratieprofiel
		< 4,5	≥ 4,0	InZ	Zuur infiltratieprofiel
			< 4,0	InZZ	Zeer zuur infiltratieprofiel

2.4.3 Bemonstering

De bemonstering is uitgevoerd door bij de boring en de drie steken met de humushapper materiaal te verzamelen. Bij de bemonstering zijn vier lagen onderscheiden, waarbij de methode van bemonstering per laag iets verschilt:

- De LF-laag, dit is het bovenste deel van de humuslaag, met de L-laag met de nog herkenbare plantendelen en de F-laag waarin de plantendelen zijn verkleind (gefragmenteerd);
- De H-laag, waarin organisch materiaal (vrijwel) volledig is gehumificeerd;
- 0 - 30 cm minerale bodem (hier A-laag genoemd);
- 30 - 100 cm minerale bodem (hier C-laag genoemd).

Bij de LF- en H-lagen is steeds ál het materiaal uit de drie steken verzameld in een mengmonster, waarbij de dimensies (breedte van de humushapper, dikte van de plak in de humushapper en dikte van de laag) in een spreadsheet werden opgenomen om het bemonsterde volume te berekenen. In

een aantal gevallen was het materiaal uit drie steken niet voldoende om het minimumvolume (400 ml voor LF en 200 ml voor H) te bemonsteren. Dan hebben wij extra steken gedaan tot het benodigde volume bemonsterd was. Als het benodigde volume niet in 10 steken bemonsterd kon worden hebben wij de laag niet bemonsterd. Deze is dan ook zo dun dat er geen wezenlijke bijdrage aan de koolstofvoorraad verwacht mag worden. De bemonsterde volumes zijn gerapporteerd en gebruikt om de voorraden te berekenen (zie § 3.3).

Voor de laag van 0 – 30 cm – mv. is steeds een mengmonster gemaakt uit de drie steken van de humushapper. De laag van 30 tot 100 cm is alleen in de boring bemonsterd, waarbij het materiaal goed gehomogeniseerd werd en een deel daarvan daarvan werd bemonsterd.

2.5 Analyse

2.5.1 Lab-analyses

Monsters van de strooisellagen zijn gedroogd (70 - 105 graden) tot ca. 1% vocht voor het bepalen van de droge massa. Vervolgens zijn ze colloïd gemalen.

Chemische analyses van strooisellagen is gebeurd op 70% gedroogd materiaal na malen, terwijl de monsters van de bovengrond zijn gebeurd op luchtdroog materiaal. C- en N-gehalten zijn gemeten met een C/N-analyser [LECO] na droge verbranding volgens het Dumas principe (Dumas, 1831). Gehalten van P, Fe en Al zijn bepaald na ammoniumoxalaat/oxaalzuur extractie met ICP-AES.

2.5.2 Berekening van voorraden

De voorraden zijn berekend uit de gehalten maal de massa van de betreffende laag.

Van de monsters van de strooisellaag is het volume bepaald door per steek het bemonsterde volume te bepalen en dat op te tellen (zie § 2.4.3). Met het bepaalde drooggewicht in de monsters is de massa van de strooisellagen berekend.

De massa van de lagen minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm) zijn bepaald op basis van de laagdikte en een soortelijk gewicht (sw). Het soortelijk gewicht van de ondergrond is bepaald op basis van (Hoekstra en Poelman, 1982):

$$sw_i = 1000 / (0,646 + 0,025 \text{ OS}\%)$$

met sw_i in g/liter en OS% als massapercentage.

Het massapercentage OS is uit het C-gehalte bepaald volgens (Howard en Howard, 1990, voor podzols):

$$\text{OS} = -0,26 + 2,09 \text{ C-gehalte}$$

met C-gehalte in als massapercentage.

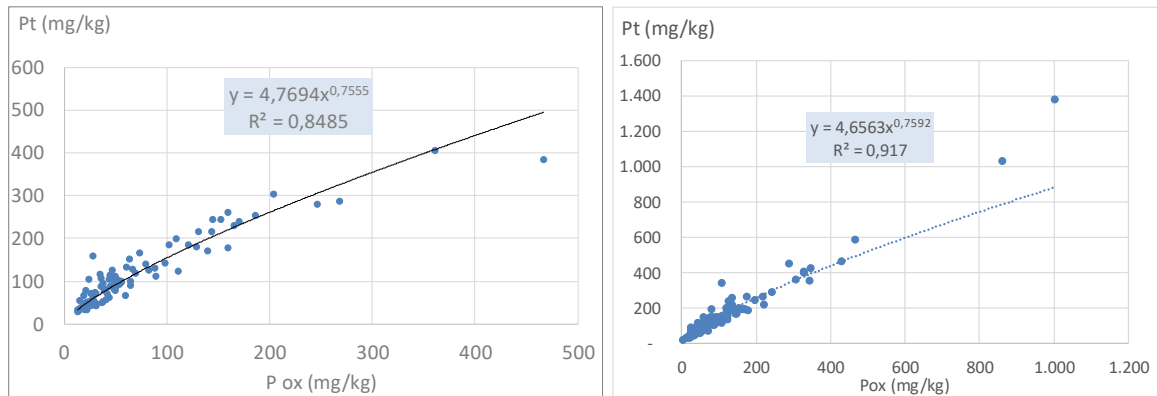
Fosfor is alleen in de A-laag (0-30 cm) gemeten, dmv oxalaatextractie. Daarmee wordt het deel van de totale fosfaatfractie gemeten dat is geadsorbeerd aan Fe- en Al-hydroxiden en daarmee potentieel beschikbaar is voor opname. De totale P-voorraad kan groter zijn, maar is dan gefixeerd in niet oplosbare mineralen en daarmee minder relevant voor de begroeiing. De feitelijke P-beschikbaarheid is daarnaast afhankelijk van de mate waaraan het gebonden is aan de Fe- en Al-hydroxiden. En dat hangt weer af van het deel van de P-buffer (het totaal van Fe- en Al-hydroxiden uitgedrukt in mmol/kg) dat bezet is met P, de fosfaatverzadigingsindex of PSI. Deze verhouding wordt uitgerekend

met: $PSI = P\text{-ox}/(Fe\text{-ox} + Al\text{-ox})$ in mmol/mmol. Voedselarme groeiplaatsen met een lage P-beschikbaarheid hebben meestal een $PSI < 0.05$.

De totale P-voorraden zijn geschat op basis van een regressie die is bepaald van op basis van 94 bodemonsters (0 - 10 en 10 - 30 cm diepte) van De Vries et al (2019).

$$Pt = 4,76 \cdot Pox^{0,7555}$$

Overigens geeft data van De Vries en Leeters (2001) vrijwel exact dezelfde relatie (Figuur 8).

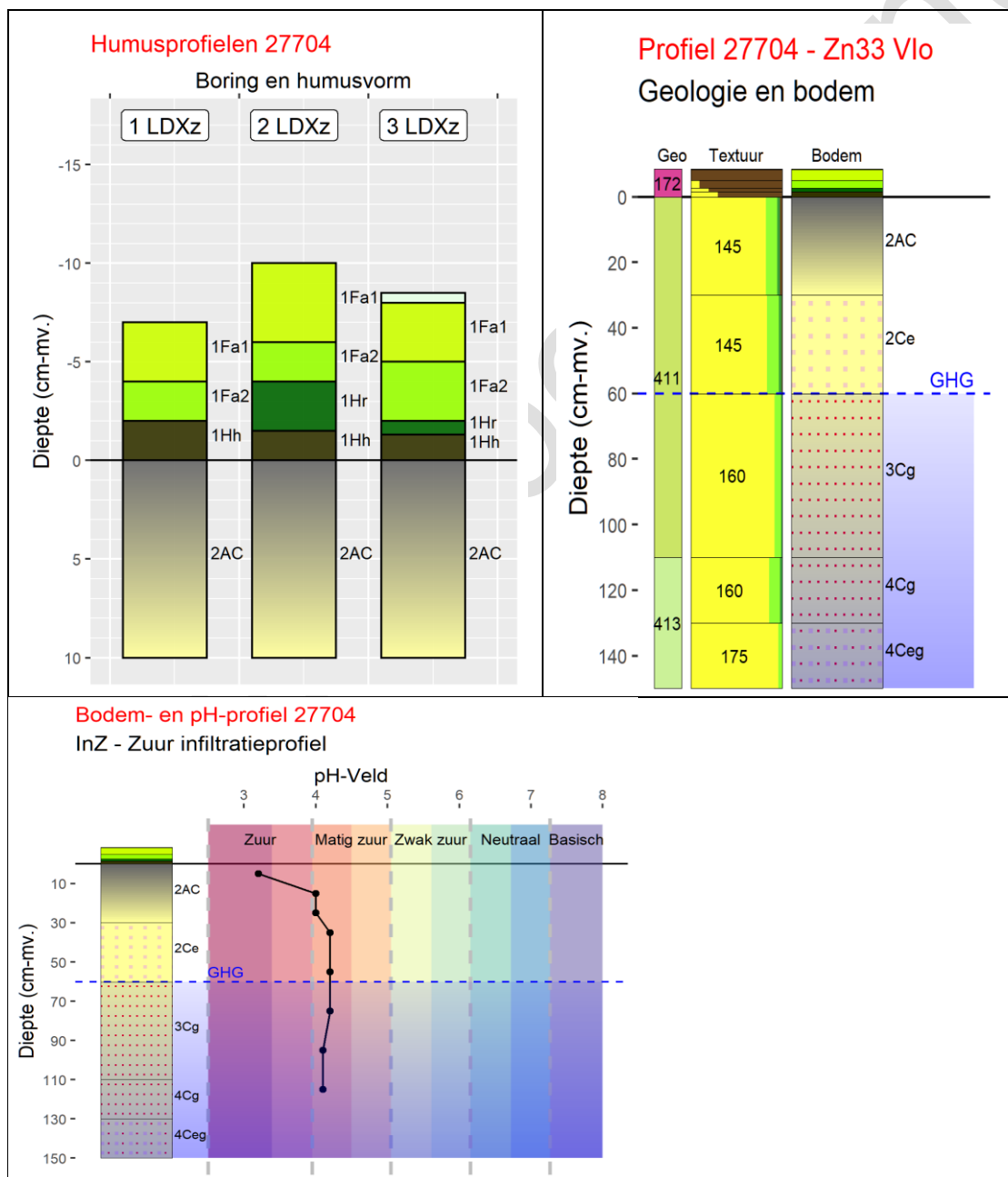


Figuur 8. Verband tussen de gehalten P-oxalaat extraheerbaar en P-totaal. Links data van De Vries et al (2019), rechts van De Vries en Leeters (2001)

3 Resultaten

3.1 Locatie- en profielbeschrijvingen

In een aparte rapportage (Dijk en van Delft, 2021) zijn overzichten opgenomen over de aangetroffen bodemeenheden, grondwatertrappen, humusvormen en pH-profieltypen. Per locatie is daarbij een informatieblad opgenomen met kaartjes en foto's van de locatie en profielen, profielschetsen van geologie, bodem, humus en pH en diverse kenmerken van de locatie. Ook zijn daarin de profielbeschrijvingen opgenomen. Dit kan dienen als naslagwerk bij de individuele locaties. In deze paragraaf geven wij nog enkele overzichten die specifiek van belang zijn in verband met de bemonstering.



Figuur 9 Voorbeeld van profielschetsen zoals opgenomen in de informatiebladen per locatie in de rapportage over de in dit project beschreven profielen (Dijk en Van Delft, 2021). Voor de toelichting bij deze schetsen en gebruikte indelingen verwijzen wij naar die rapportage.

3.1.1 Strata

Zoals toegelicht in § 2.3, is op basis van het voorkomen van combinaties van boomsoort, bodem en vochtigheid (volgens de NFI steekproef) een steekproef van NBI-punten opgezet. De bemonstering is uitgevoerd bij grove den, Douglasspar, zomereik en berk, op humus- en moderpodzolgronden en vaaggronden, waar mogelijk van nat tot droog.

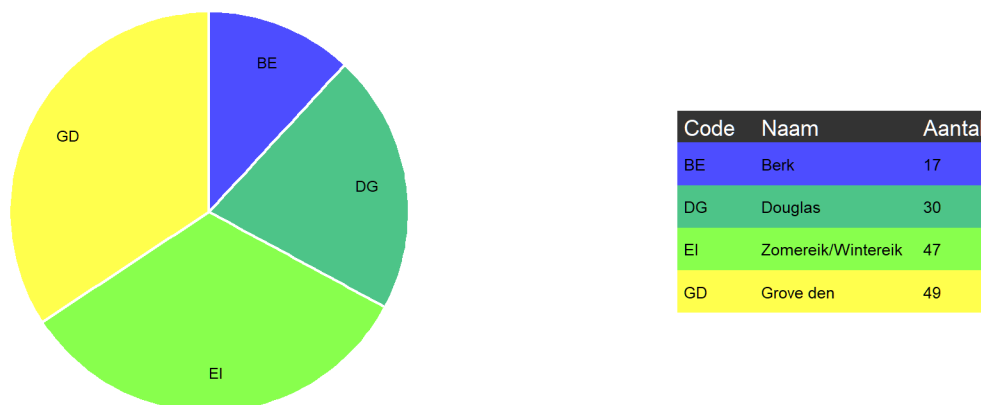
In dit overzicht geven wij de verdeling van het aantal locaties over de strata. In de volgende samenvattingen van 'Boomsoort' (§ 0) en 'Bodem en Vocht' (§3.1.3) staan de kenmerken zoals wij ze bij de bemonstering beoordeeld hebben. In een aantal gevallen kunnen die afwijken.

Tabel 11 Verdeling van de locaties over strata.

Code	Naam	Aantal
H-D-BE	Humuspodzolgrond droog, Berk	4
H-D-DG	Humuspodzolgrond droog, Douglas	11
H-D-EI	Humuspodzolgrond droog, Zomereik/Wintereik	10
H-D-GD	Humuspodzolgrond droog, Grove den	13
H-N-BE	Humuspodzolgrond nat, Berk	4
H-N-EI	Humuspodzolgrond nat, Zomereik/Wintereik	8
H-N-GD	Humuspodzolgrond nat, Grove den	7
H-V-BE	Humuspodzolgrond vochtig, Berk	3
H-V-DG	Humuspodzolgrond vochtig, Douglas	6
H-V-EI	Humuspodzolgrond vochtig, Zomereik/Wintereik	12
H-V-GD	Humuspodzolgrond vochtig, Grove den	6
V-D-BE	Vaaggrond droog, Berk	3
V-D-DG	Vaaggrond droog, Douglas	6
V-D-EI	Vaaggrond droog, Zomereik/Wintereik	7
V-D-GD	Vaaggrond droog, Grove den	8
V-V-GD	Vaaggrond vochtig, Grove den	4
Y-D-BE	Moderpodzolgrond, Berk	3
Y-D-DG	Moderpodzolgrond, Douglas	8
Y-D-EI	Moderpodzolgrond, Zomereik/Wintereik	10
Y-D-GD	Moderpodzolgrond, Grove den	10

3.1.2 Boomsoort

In de steekproef zijn de boomsoorten geselecteerd volgens de NFI steekproef. Tijdens de bemonstering is genoteerd wat de twee belangrijkste boomsoorten zijn op de locatie, op het moment van de bemonstering. In deze samenvatting is aangegeven welke boomsoort als eerste is genoteerd (met de hoogste bedekking). Dat kan in enkele gevallen afwijken van de opgave in de NFI steekproef. Bij de beschrijving in de informatiebladen per locatie (zie Dijk en Van Delft, 2021) is aangegeven wat de 1^{ste} en 2^e boomsoort waren, met een eenvoudige inschatting van de bedekking in vier klassen.

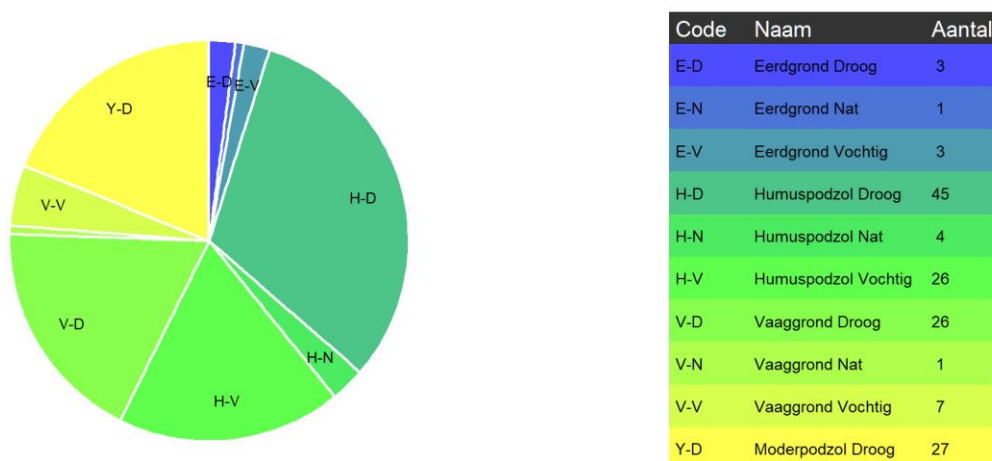


Figuur 5 Verdeling van de locaties over Boomsoort.

3.1.3 Bodem en Vocht

In de steekproef zijn de locaties geselecteerd op basis van bodemtype en grondwatertrap volgens de gegevens in de NFI database. Deze is gebaseerd op de Bodemkaart van Nederland en de daarop vermelde grondwatertrappen. Op basis hiervan is een indeling gemaakt naar humus- en moderpodzolgronden en vaaggronden, waar mogelijk van nat tot droog. Vanwege de kaartschaal en als gevolg van verdroging kan de situatie in het veld daarvan afwijken. Ook is de werkelijke groeiplaats van bomen op rabatten meestal droger dan op de bodemkaart is aangegeven.

In dit overzicht geven wij de werkelijke verdeling van het aantal locaties over de strata voor bodem en vochtklasse op basis van de profielbeschrijvingen bij de bemonstering. Daarbij is op 7 locaties een eerdgrond aangetroffen. Dit bodemtype maakte geen onderdeel uit van de selectie, maar komt dus lokaal wel voor. Het gaat om gooreerdgronden (tZn..) op 3 locaties, gooreerdgronden met een matig dikke bovengrond (cZn..) op 3 locaties en een akkereerdgrond (cZd51p) op 1 locatie.



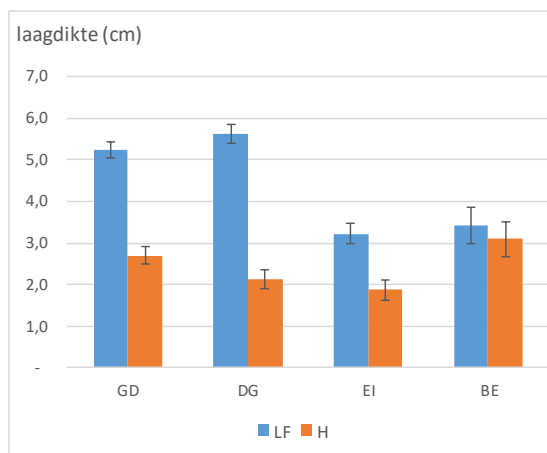
Figuur 6 Verdeling van de locaties over Bodem en Vocht.

3.2 Dikte van de strooisellagen

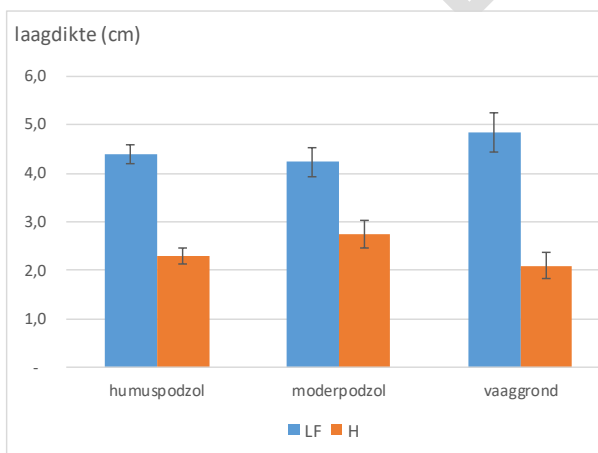
De dikte van de strooisellagen bedraagt voor de vier hoofdboomsoorten gemiddeld 4,4 cm voor de LF-laag en 2,4 cm voor de H-laag. De naaldboomsoorten grove den en Douglas hebben een duidelijk dikkere LF-laag dan eik en berk (figuur 10). De verschillen tussen de bodemtypen zijn minder duidelijk. Gemiddeld hebben de vaaggronden een dikkere LF-laag en een dunnere H-laag (figuur 11,

figuur 12). Overigens betreft het hier de boomsoorten en bodemtypen in de stratificatie, volgens de NFI gegevens. Met name de bodemtypen kunnen nog wel eens afwijken van de situatie in het veld.

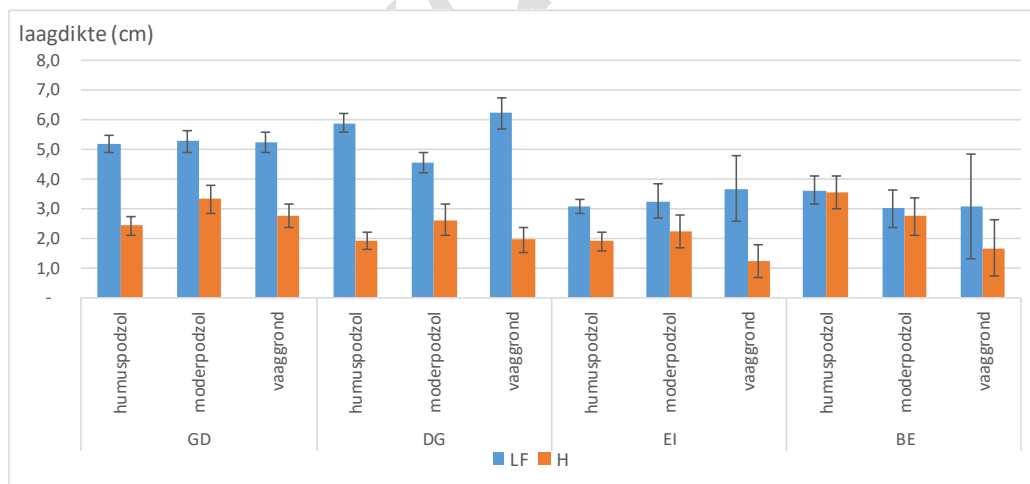
In het algemeen lijken de diktes van de LF-laag te zijn afgenomen ten opzichte van 1990 (tabel 12), terwijl die van de H-laag is toegenomen. Dit kan duiden op een snellere strooiselomzetting, maar de leeftijd van de bosgroeiplaats zal ook een rol spelen. In 1990 was een deel van de opstanden nog relatief jong, bebossingen uit de jaren 1930 waren toen 60 jaar oud, nu 90 jaar. Met het ouder worden van een bosgroeiplaats neemt de dikte van de H-horizonten toe. In een evenwichtssituatie blijven diktes van L- en F-horizonten min of meer constant, terwijl de h-horizont in dikte toeneemt. De afname van de dikte van L- en F-horizonten zal dan wel met een snellere afbraak te maken hebben. Bij grove den en Douglas komt dit mogelijk mede doordat er meer bijmenging is van loofboomsoorten in de ondergroei.



Figuur 10. Gemiddelde dikte van de LF-laag en de H-laag, met de standaardfout, voor grove den (GD), Douglas (DG), eik (EI) en berk (BE)



Figuur 11 Gemiddelde dikte van de LF-laag en de H-laag, met de standaardfout, voor drie bodemtypen



Figuur 12 Gemiddelde dikte van de LF-laag en de H-laag, met de standaardfout, voor de combinaties van de boomsoorten grove den (GD), Douglas (DG), eik (EI) en berk (BE) en de bodemtypen

Tabel 12. Strooiseldikte (mediaan) in cm, in 1990 (de Vries en Leeters, 2001) en 2020

Boomsoort	Strooiseldikte (mediaan) in cm					
	LF		H		LFH	
	1990	2020	1990	2020	1990	2020
Grove den	7,4	5,1	1,9	2,7	8,5	7,9
Douglas	6,6	5,5	0,5	2,0	7,4	7,5
Eik	6,0	3,4	0,9	2,1	7,9	5,1
Berk	n.a.	3,2	n.a.	3,1	n.a.	7,4

3.3 Koolstofgehalten

De koolstofgehalten verschillen duidelijk tussen de bodemlagen. De C-gehalten in de LF-laag zijn het hoogst en bedragen gemiddeld 383 g/kg (tabel 13). In de H-laag zijn de C-gehalten duidelijk lager (271 g/kg), wat duidt op vermenging met zand. In de minerale bovengrond (0-30 cm) bedragen de C-gehalten gemiddeld 24 g/kg, wat neerkomt op een organische-stofgehalte van grofweg 5%. De C-gehalten in de minerale ondergrond (30-100 cm) zijn betrekkelijk klein (8 g/kg), maar gezien de massa van die laag is dit toch van wezenlijk belang voor de totale C-voorraad.

C-gehalten in de LF- en H-laag bij eik zijn gemiddeld lager dan bij de andere boomsoorten (tabel 13). De gehalten in de minerale bovengrond (0-30 cm) zijn echter bij berk het hoogst, wat mede kan komen doordat er meer vermenging is in de bovengrond (berk als semi-rijkstrooiselsoort).

Verschillend in C-gehalten in de LF- en H-laag tussen de bomentypen zijn betrekkelijk klein. Wel vallen de hogere gehalten op in de minerale bovengrond en minerale ondergrond bij humuspodzolgronden. In deze bodems vindt meer accumulatie van koolstof plaats door inspoeling ten opzichte van de moderpodzolgronden (rijker bodemleven) en de vaaggronden (jongere bodems).

Tabel 13. Koolstofgehalten, gemiddeld, mediaal en 5% en 95%-percentiel, van de LF-laag, de H-laag, de de minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm)

	Gehalte C (g/kg)			
	LF	H	0-30 cm	30-100 cm
5% percentiel	211	146	5,9	1,7
Mediaan	407	276	22,8	5,5
Gemiddeld	383	271	24,1	7,9
95% percentiel	493	371	49,0	19,5

Tabel 14. Gemiddelde koolstofgehalten van de LF-laag, de H-laag, de minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm), voor vier boomsoorten

	Gehalte C (g/kg)			
	LF	H	0-30 cm	30-100 cm
Grove den	426	317	20,9	6,9
Douglas	409	262	23,6	9,1
Eik	314	221	25,9	8,4
Berk	391	266	29,3	7,0

Tabel 15 Gemiddelde koolstofgehaltes van de LF-laag, de H-laag, de minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm), voor drie bodemtypen

	Gehalte C (g/kg)			
	LF	H	0-30 cm	30-100 cm
Humuspodzolgrond	387	273	28,7	9,3
Moderpodzolgrond	373	261	19,4	4,8
Vaaggrond	381	279	15,5	6,9

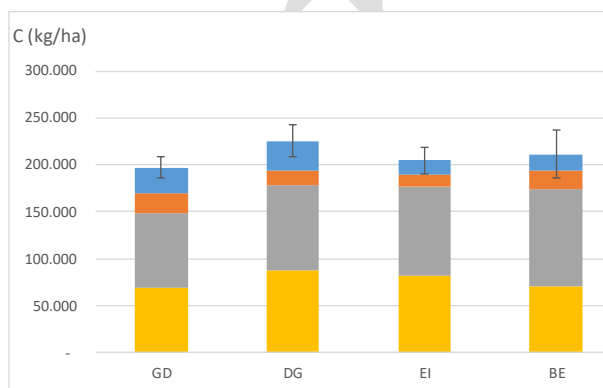
3.4 Koolstofvoorraden

De koolstofvoorraden in de bodem, gesommeerd over de strooisellaag en het pakket tot 100 cm – mv., bedragen gemiddeld voor de vier boomsoorten 207 ton C/ha. Het grootste deel daarvan, 90 ton C/ha zit in de de minerale bovengrond, terwijl 77 ton C/ha in de minerale ondergrond zit. De gezamenlijke voorraad in de humuslaag is gemiddeld 40 ton C/ha, waarvan 23 in de LF en 17 in de H-laag.

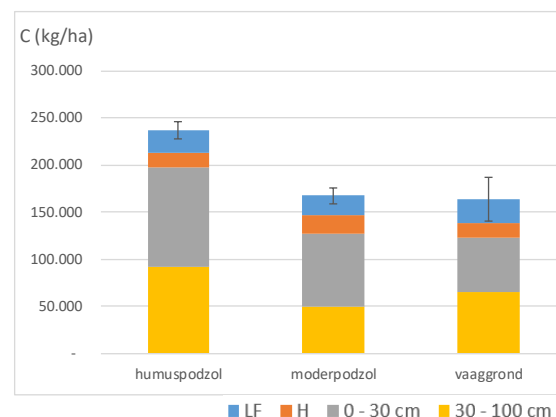
Gemiddeld zijn de voorraden het hoogst bij Douglas, wat vooral komt door hoger dan gemiddelde voordaden in de LF-laag (figuur 13). Bij grove den zijn de voorraden gemiddeld het laagst, door lager dan gemiddelde voorraden in de minerale bovengrond en minerale ondergrond.

Humuspodzolgronden hebben duidelijk grotere C-voorraden dan de andere twee bodemtypen, wat een direct gevolg is van de hogere C-gehaltes in de minerale bovengrond en minerale ondergrond (paragraaf 3.3). Natte bodems hebben gemiddeld een hogere C-voorraad dan vochtige of droge bodems, wat vooral komt door hogere voorraden (gehaltes) in de minerale bovengrond en minerale ondergrond (figuur 14).

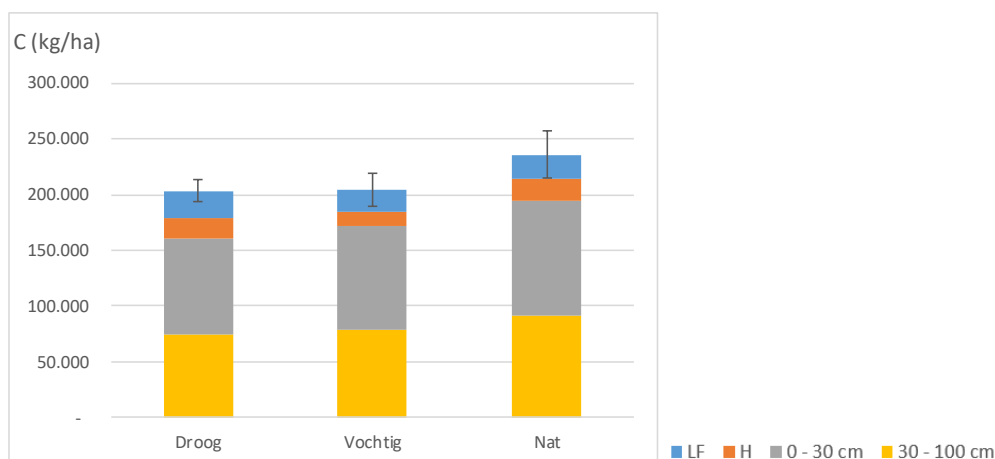
De voorraden zijn voor grove den en Douglas spar hoger dan in 1990 gemeten is (tabel 16), terwijl voor eik de voorraden in de minerale bodem min of meer gelijk zijn en die in de LFH-laag lager zijn. Voor een goed vergelijk dient nog goed gekeken te worden hoe de verdeling daarvan is geweest over de verschillende bodemtypen.



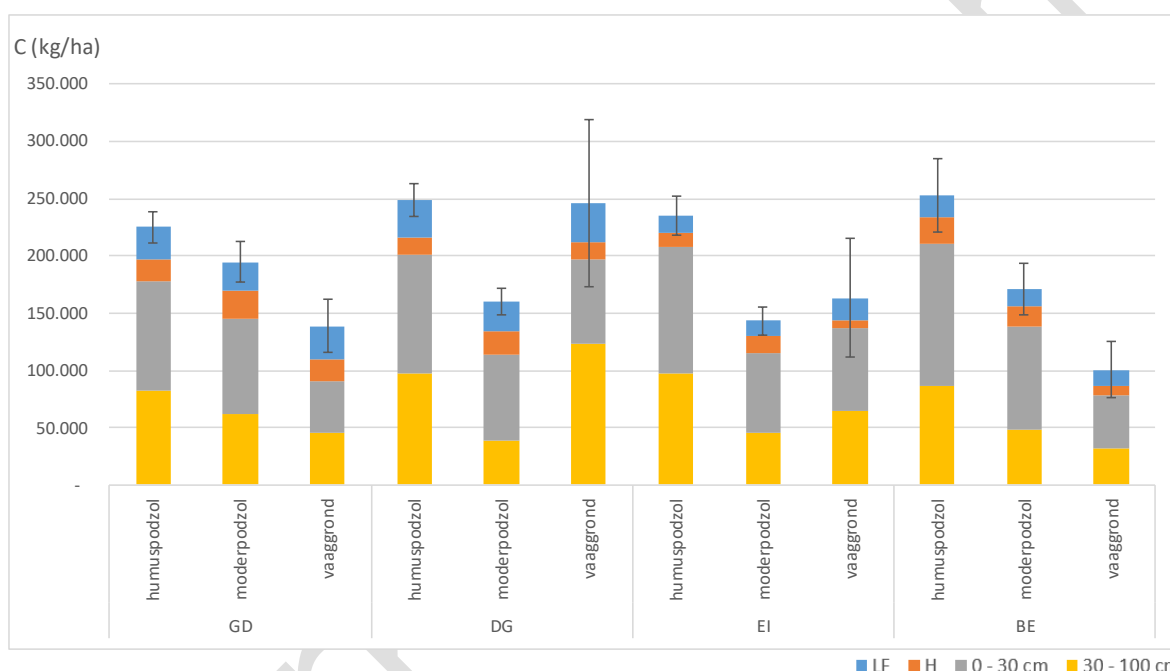
Figuur 13 Gemiddelde koolstofvoorraden van de LF-laag, de H-laag, de minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm) met de standaardfout, voor grove den (GD), Douglas (DG), eik (EI) en berk (BE)



Figuur 14 Gemiddelde koolstofvoorraden van de LF-laag, de H-laag, de minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm) met de standaardfout voor het totaal, voor drie bodemtypen



Figuur 15 Gemiddelde koolstofvoorraden van de LF-laag, de H-laag, de minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm) met de standaardfout voor het totaal, voor drie vochtclassen

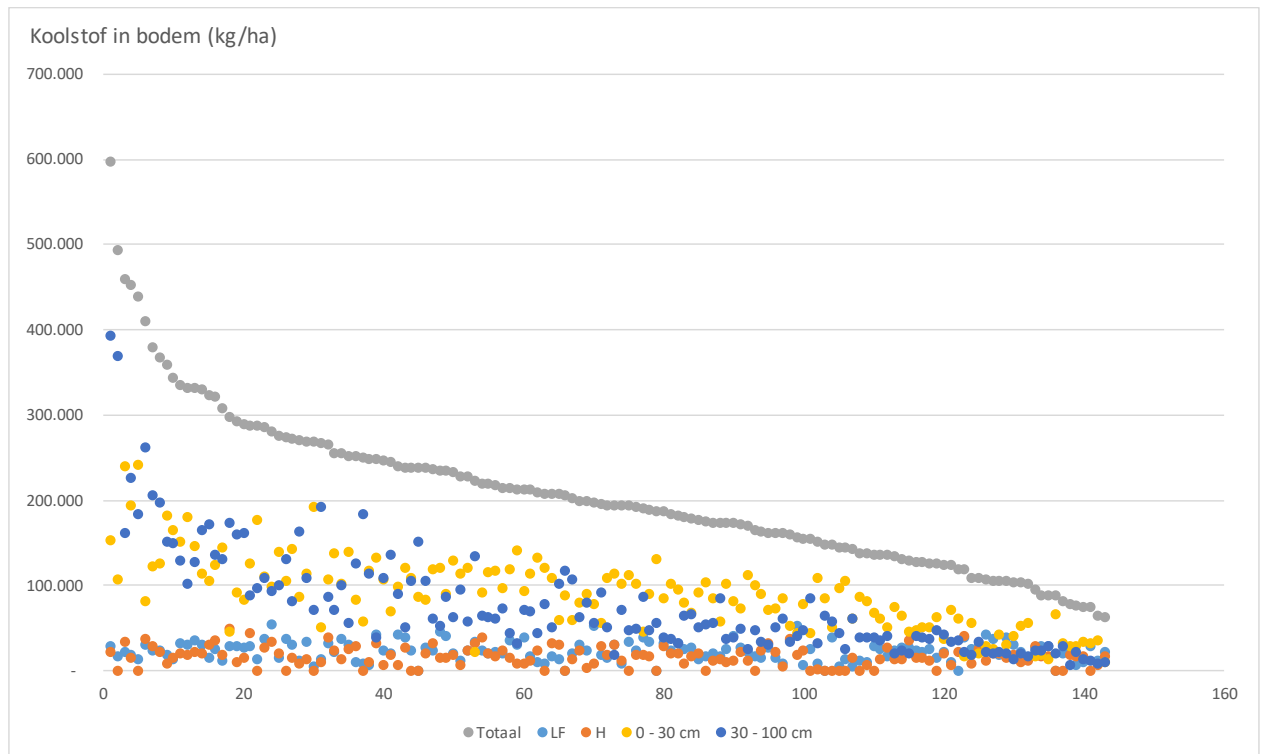


Figuur 16. Gemiddelde koolstofvoorraden van de LF-laag, de H-laag, de minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm) met de standaardfout, voor de combinaties van de boomsoorten grove den (GD), Douglas (DG), eik (EI) en berk (BE) en de bodemtypen

Tabel 16 Koolstofvoorraden (gemiddeld) in de LFH-laag en minerale bovengrond in 1990 (De Vries en Leeters, 2001) en 2020 (deze rapportage)

Boomsoort	C-voorraad LFH laag (ton C/ha)		C-voorraad minerale bovengrond (ton C/ha)	
	1990	2020	1990	2020
Grove den	41,07	47,95	57,39	79,89
Douglas spar	33,79	47,03	68,27	90,76
Fijnspar				
Lariks				
Eik	32,52	27,37	95,06	95,30
Beuk				
Berk	n.a.	37,06	n.a.	104,30

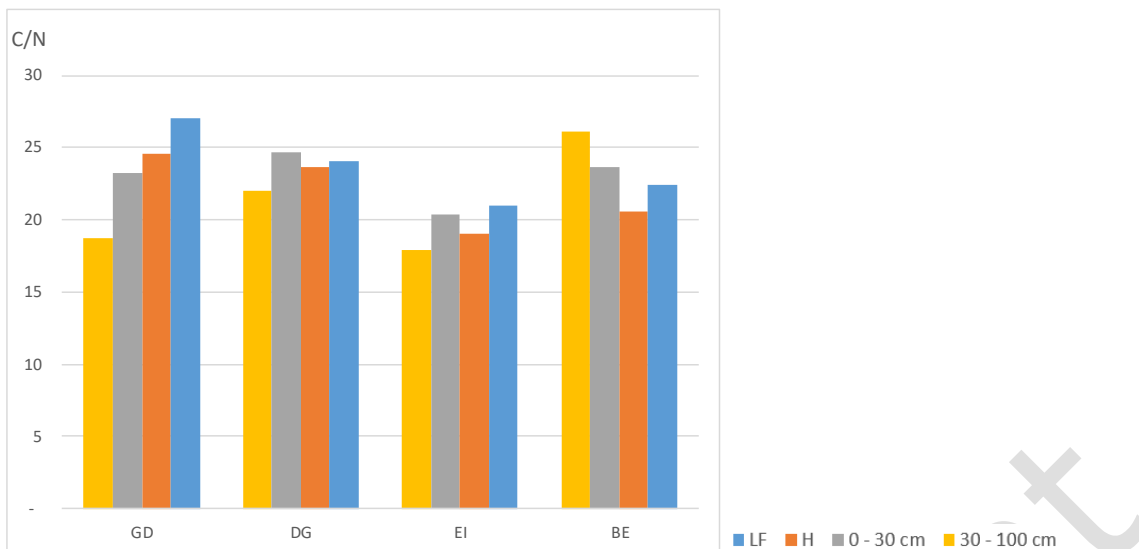
De verschillen in C-voorraad tussen de locaties worden vooral veroorzaakt door verschillen in voorraden in de minerale bovengrond en minerale ondergrond. In figuur 17 zijn de totale voorraden per plot in afnemende volgorde weergegeven. Daarbij zijn ook de voorraden van de afzonderlijke lagen weergegeven. Er is te zien dat de voorraden in de van de LF- en H-lagen binnen zekere marges variëren, maar dat vooral de voorraden in de minerale bovengrond en minerale ondergrond sterk verschillen tussen de plots.



Figuur 17. Koolstofvoorraad per plot, totaal, en van de LF-laag, de H-laag, minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm) en per, gerangschikt naar totale voorraad (van hoog naar laag)

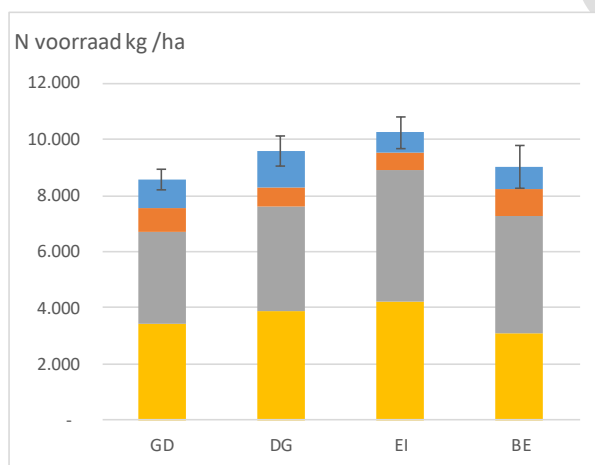
3.5 Stikstof

De C/N verhoudingen verschillen in beperkte mate tussen de bodemlagen en boomsoorten (figuur 18). Gemiddeld is de C/N-verhouding in de LF-laag het hoogst, namelijk 23,9, terwijl deze in de C-laag met 20,1 gemiddeld het laagst is. De laagste gemiddelde waarden werden gevonden in de C-laag bij eik (18) en grove den (19), terwijl de LF-laag van grove den gemiddeld de hoogste waarde heeft (26). De C/N-verhoudingen in de LF, H en minerale ondergrond zijn bij eik gemiddeld lager dan bij de andere boomsoorten. Opvallend is dat bij berk de hoogste gemiddelde C/N verhoudingen werden gevonden in de minerale ondergrond.

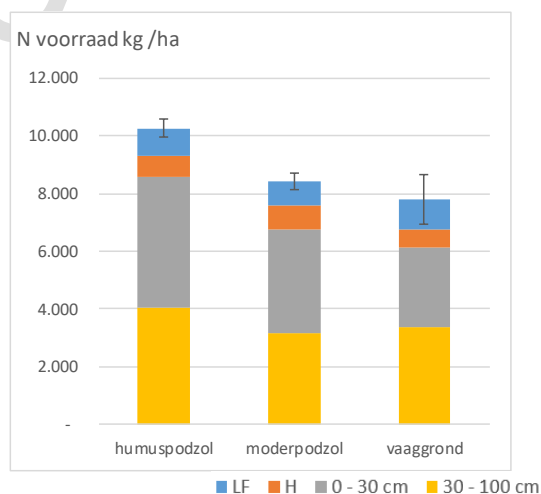


Figuur 18. C/N-verhouding van de LF-laag, de H-laag, de minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm) met de standaardfout, voor grove den (GD), Douglas (DG), eik (EI) en berk (BE)

De stikstofvoorraden bedragen gemiddeld 9.398 kg N/ha. Uit de relatief constante C/N verhoudingen (zie hierboven) volgt dat de verdeling van de C-voorraden een goede eerste indicatie geeft voor de verdeling van de N-voorraden. Gemiddeld zijn de N-voorraden bij eik het hoogst (figuur 19), mede gezien de gemiddeld lagere C/N-verhoudingen in de LF, H en minerale bovengrond. Bij humuspodzolgronden zijn de de N-voorraden gemiddeld hoger dan bij moderpodzolgronden en vaaggronden (figuur 20).



Figuur 19. Voorraad stikstof (N) van de LF-laag, de H-laag, minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm) met de standaardfout, voor grove den (GD), Douglas (DG), eik (EI) en berk (BE)



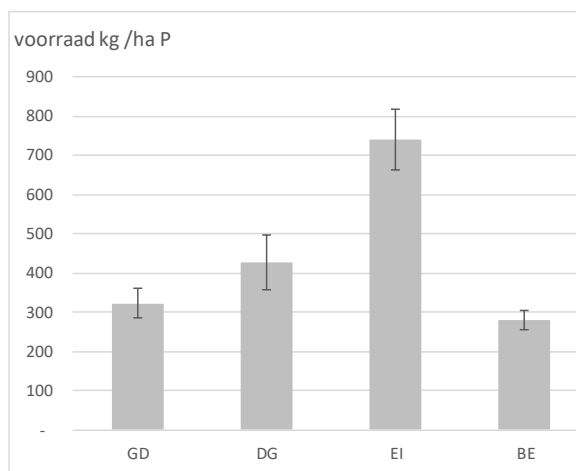
Figuur 20. Voorraad stikstof (N) van de LF-laag, de H-laag, minerale bovengrond (0-30 cm) en minerale ondergrond (30-100 cm) met de standaardfout, voor drie bodemtypen

Tabel 17. Stikstofvoorraden (gemiddeld) in ton/ha, in 1990 (de Vries en Leeters, 2001) en 2020

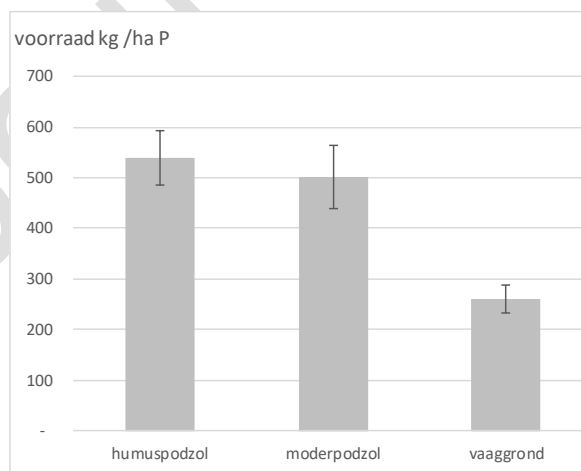
Boomsoort	Stikstofvoorraden (gemiddeld) in ton/ha			
	LFH		minerale bovengrond (0 - 30 cm)	
	1990	2020	1990	2020
Grove den	1,40	1,85	2,54	3,27
Douglas	1,37	1,97	3,43	3,77
Eik	1,43	1,35	4,95	4,70
Berk	n.a.	1,75	n.a.	4,19

3.6 Fosfor

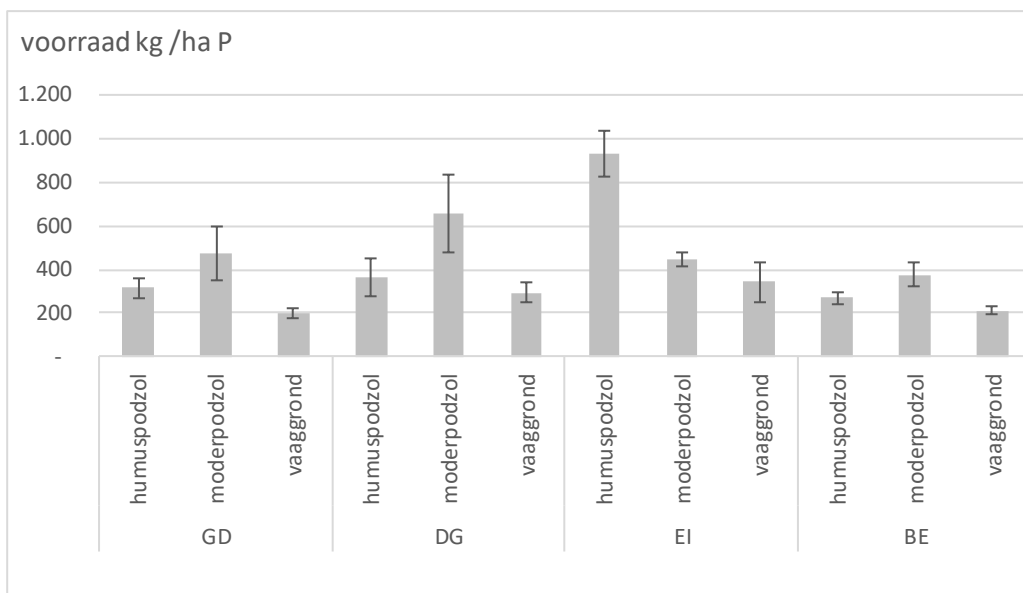
Het P-ox gehalte in de minerale bovengrond is gemiddeld 86 mg/kg. Daaruit is het P-totaal gehalte geschat van gemiddeld 124 mg/kg. De geschatte P-voorraad in minerale bovengrond (0 - 30 cm) bedraagt gemiddeld 562 kg/ha, en de mediaan is 353 kg/ha. Bij eik is deze voorraad duidelijk hoger dan bij de andere boomsoorten, namelijk 887 kg/ha (figuur 21). Bij vaaggronden is de gemiddelde P-voorraad duidelijk lager dan bij humus- of moderpodzolgronden (figuur 22). De hoger dan gemiddelde voorraden bij eik komen ook voornamelijk voor bij humuspodzolgronden, terwijl lage gemiddelde waarden vooral bij grove den en berk op vaaggronden gevonden worden (figuur 23).



Figuur 21. Voorraad fosfor (P) van de minerale bovengrond (0-30 cm) met de standaardfout, voor grove den (GD), Douglas (DG), eik (EI) en berk (BE)



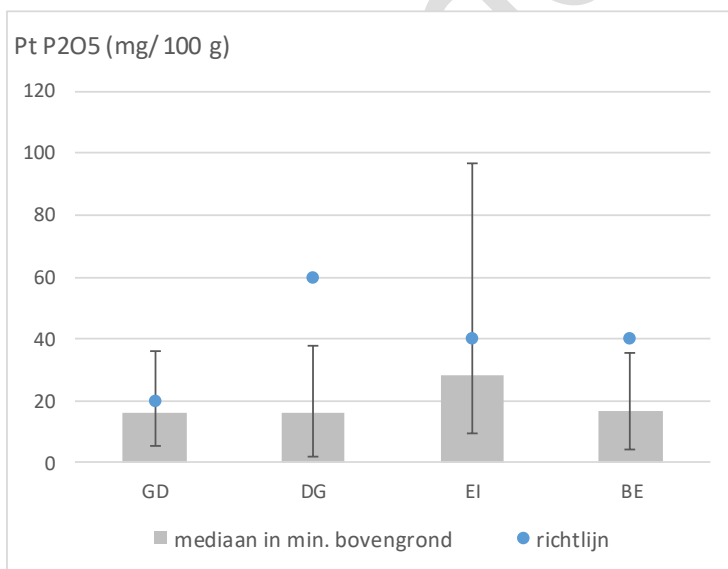
Figuur 22 Voorraad fosfor (P) van de minerale bovengrond (0-30 cm) met de standaardfout, voor drie bodemtypen



Figuur 23. Gemiddelde voorraden fosfor (P) in minerale bovengrond (0-30 cm) met de standaardfout, voor de combinaties van de boomsoorten grove den (GD), Douglas (DG), eik (EI) en berk (BE) en de bodemtypen

De gemiddelde P₂₀₅-gehalte is 28 mg/100 g. Dit gemiddelde wordt omhoog getrokken door bodems met een duidelijk hoger gehalte, vooral bij eik. De mediane waarde voor P₂₀₅ is 18 mg/100g. Een waarde van 20 is voor veel boomsoorten laag, en ook voor weinig eisende soorten (grove den) is dit al aan de lage kant. Meer dan 50% van de gemeten locaties heeft dus een lage waarde.

Een richtlijn voor fosfaat in de bodem is door van den Burg en Schaap (1995) gegeven voor verschillende boomsoorten. De geschatte gehalten (op basis van P oxalaat extractie) zijn in het algemeen laag ten opzichte van de richtlijn volgens van den Burg en Schaap (1995). Bij alle vier boomsoorten is de mediane waarde lager dan de richtlijn, wat betekent dat meer dan 50% van de locaties een waarde heeft lager dan de richtlijn. Bij Douglas en berk is ook het 3de kwartiel lager dan de richtlijn, wat inhoudt dat 75% van de waarden onder de richtlijn zit (figuur 24).



Figuur 24. Mediane gehalten voor fosfor (P₂₀₅, mg/ 100 g bodem) in de minerale bovengrond (0-30 cm) met de waarden voor het eerste en derde kwartiek (error bars), voor de boomsoorten grove den (GD), Douglas (DG), eik (EI) en berk (BE). Daarbij is de waarde van de richtlijn aangegeven volgens van den Burg en Schaap (1995), waarbij voor berk de waarde voor eik is aangenomen.

Werkdocument

Literatuur

Bakker, H. de & Schelling, J., 1989. Systeem van bodemclassificatie voor Nederland; de hogere niveaus. Wageningen, Pudoc.

Bijlsma, R.J., S.P.J. van Delft, R. Loeb en R. Bobbink 2020. Kansen voor oude droge heide in het heidelandschap. Rapport nummer 2020/OBN240-DZ, VBNE, Driebergen.

Burg, J. van den, en Schaap, W., 1995. Richtlijnen voor mineralentoediening en bekalking als effectgerichte maatregelen in bossen. Wageningen, Rapport IKC Natuurbeheer 16, 63 p.

Cate, J.A.M. ten, Van Holst, A.F., Kleijer, H. & Stolp, J., 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek; Richtlijnen en voorschriften; Deel A: Bodem. Wageningen, SC-DLO. Technisch document 19A. 222 p.

Delft, Bas, van De Waal, Rein, Kemmers, Rolf, Mekking, Peter & Sevink, Jan, 2006. Field guide Humus Forms; Description and classification of humus forms for ecological applications. Wageningen, Alterra.

De Vries, W. en E.E.J.M. Leeters, 2001. Chemical composition of the humus layer, mineral soil and soil solution of 150 forest stands in the Netherlands in 1990. Wageningen, Alterra, Green World Research. Alterra-Report 424.1. 114 pp. 12 fig.; 84 tab.; 129 ref.

De Jong, J.J., J. Bloem, S.P.J. v. Delft, P.W.F.M. Hommel, A. Oosterbaan en R.W. de Waal (2015) Ecologie van bosbodems; Een verkennende studie naar ecologisch functioneren van bosbodems op zandgronden. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2657.

Vries W. De, A. de Jong, J. Kros and J. Spijker, 2019. The effect of harvesting logs and branch and top timber on nutrient balances in forests on sandy soils. Model calculations as the basis for an advisory system (in Dutch). WenR rapport 2923, 78p.

De Vries, W. en E.E.J.M. Leeters (2001) Chemical composition of the humus layer, mineral soil and soil solution of 150 forest stands in the Netherlands in 1990. Wageningen, Alterra, Green World Research. Alterra-rapport 424.1.

Dijk, Pieter en Bas van Delft, 2021. Profielen Bosbodem C. Wageningen, Wageningen Environmental Research. PorVIVis-rapport.

Dumas, J.B.A. 1831. Procédes de L'analyse Organique. Ann. Chim. Phys., 47, p. 198 - 205.

Hanegraaf, M.C., E. Hoffland, P.J. Kuikman en L. Brussaard (2009) Trends in soil organic matter in Dutch grasslands and maize fields on sandy soils. European Journal of Soil Science, April 2009 (60): 2013-222.

Hoekstra, C. and J.N.B. Poelman, 1982. Dichtheid van gronden gemeten aan de meest voorkomende bodemeenheden in Nederland. Wageningen, Stichting voor Bodem-kartering, Rapport nr. 1582, 47 pp.

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

Janowiak, M., W.J. Connelly, K. Dante-Wood, G.M. Domke, C. Giardina, Z. Kayler, K. Marcinkowski, T. Ontl, C. Rodriguez-Franco, C. Swanston, C.W. Woodall and M. Buford (2017) Considering Forest and Grassland Carbon in Land Management. USDA Forest Service, General Technical Report WO-95

Lesschen, Jan Peter, Hanneke Heesmans, Janet Mol-Dijkstra, Anne van Doorn, Eric Verkaik, Isabel van den Wyngaert, Peter Kuikman, 2012. Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur. Wageningen, Alterra, Alterra rapport 2396.

Morison, J., R. Matthews, G. Miller, M. Perks, T. Randle, E. Vanguelova, M. White and S. Yamulki (2012) Understanding the carbon and greenhouse gas balance of forests in Britain. Scotland, Edinburgh, Forestry Commission, Forestry Commission Research Report.

Schulp, C.J.E. (2009). The carbon copy of human activities - How long-term land use explains spatial variability of soil organic carbon stocks at multiple scales. Thesis Wageningen University, The Netherlands.

Van den Burg, J., P.H. Schoenfeld en J. Oude Voshaar (1987) Veranderingen in groei en groeplaats van twee generaties naaldboomopstanden op voormalige heidegronden in Drente. Wageningen, Rijksinstituut voor onderzoek in de bos- en landschapsbouw "De Dorschkamp", rapport nr. 491.

Van den Burg, J. (1999) Bodemchemische eigenschappen en elementvoorraden van de bodem in Nederlandse bossen. Resultaten van het onderzoek door "De Dorschkamp" in de periode 1950-1991. Wageningen, Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, IBN-rapport 434.

Werkdocument

Annex 1 Overzicht van bemonsteringsmethode en opstandskenmerken van de gebruikte literatuur

literatuurbron	bemonstering strooisel	bemonstering minerale bodem	bodemtype	GT	boomsoort	leeftijd boomsoort
van den Burg en Schoenfeld 1987	ruwe humus, mengmonster strooisellaag van 20 steken a 100cm ²	mengmonster laag 0-25cm per opstand 30 steken	Hn31, Hn32k, Hn41, Hn51, Hd31, Hd31k, Hd41, Hd51, Zvp41	II, III, IV, V, VI, VII, VIII	dg, jl, fs, ss	wel opgenomen, niet gerelateerd aan C gehalten
van den Burg 1999 (overzicht onderzoek 1950-1991)	nee	laag 0-25cm wortelzone	alle bodemtypen NL (50.000 legenda) geen onderscheid in textuur	alle	gd, cd, od, fs, ss, jl, dg, po, ze, we, ei, ae, be, sw, besd, bu, es	Niet bekend
de Vries en Leeters 2001	bemonstering L, F en H met steekboor diam. 14,8 cm	bemonstering met steekguts diam 2,5 cm 20 steken per opstand van lagen 0-30 cm en 60-100 cm	Hn, Hd, Y, cY, Zn, Zb, Zd, EZ, pZg, Wp, KR/KT	II, III, IV, V, VI, VII, VIII	gd, cd/od, dg, fs, jl, ei, bu	boomhoogte ipv leeftijd
Schulp 2009	bemonstering L, F, H monolith profile sampler 35cm ² , 10 steken	bemonstering lagen 0-10cm en 10-20 cm met monolith profile sampler 35cm ² , 10 steken	Y	VIII	gd, dg, jl, ei bu	alle soorten 60 jaar, bu ook 170 jr
Lesschen et al. 2012		0-30 cm	onbekend	nat/droog	Bossen met productiefunctie, vochtige bossen, droge loofbossen, droge naaldbossen	onbekend

Werkdocument

Wageningen Environmental Research
P.O. Box 47
6700 AA Wageningen
The Netherlands
T +31 (0)317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Report
ISSN 1566-7197

The mission of Wageningen University and Research is "To explore the potential of nature to improve the quality of life". Under the banner Wageningen University & Research, Wageningen University and the specialised research institutes of the Wageningen Research Foundation have joined forces in contributing to finding solutions to important questions in the domain of healthy food and living environment. With its roughly 30 branches, 5,000 employees and 10,000 students, Wageningen University & Research is one of the leading organisations in its domain. The unique Wageningen approach lies in its integrated approach to issues and the collaboration between different disciplines.



Werkdocument