



Uppskattning av volymvikten i svenska skogsjordar från halten organiskt kol och markdjup

Prediction of bulk density in Swedish forest soils from the organic carbon content and soil depth

**Torbjörn Nilsson
Lars Lundin**

Rapporter i skogsekologi och skoglig marklära
Reports in Forest Ecology and Forest Soils

Institutionen för skoglig marklära
Department of Forest Soils

Swedish University of Agricultural Sciences

Rapport 91
Report 91
Uppsala 2006

ISSN 0348-3398

ISRN SLU-SKOMA-R--91--SE

**Uppskattning av
volymvikten i svenska
skogsjordar från halten
organiskt kol och markdjup**

*Prediction of bulk density in Swedish
forest soils from the organic carbon
content and soil depth*

**Torbjörn Nilsson
Lars Lundin**

**Uppsala
Augusti 2006**

**Institutionen för skoglig marklära
Sveriges lantbruksuniversitet**

Innehållsförteckning

Sammanfattning	5
Summary	6
Inledning	7
Material och metoder	9
Datamaterial	9
Funktioner från andra undersökningar	10
Resultat	13
Test av tidigare publicerade funktioner	13
Både humus- och mineraljordsprover	13
Enbart mineraljordsprover	15
Enbart humusprover	16
Nya funktioner beräknade från det svenska datamaterialet	16
Samband mellan volymvikt och kolhalt samt markdjup	16
Funktioner för humuslagret	17
Funktioner för mineraljorden	19
Funktioner för jordprov från humuslager och mineraljord	21
Jämförelser av uppmätt och beräknad volymvikt i enskilda markprofiler	24
Diskussion och slutsats	26
Referenser	28
Bilaga A: Tidigare publicerade funktioner för beräkning av volymvikten	31

Sammanfattning

Volymvikt är en viktig markvariabel ur många synvinklar. Ofta tas dock inga jordprover för bestämning av volymvikten eftersom det kan vara komplicerat och tidskrävande, speciellt i skogsjordar innehållande sten och block. Volymvikten kan då istället uppskattas på olika sätt, bland annat med s.k. 'pedo-transfer functions' (PTF). I dessa funktioner används andra uppmätta markvariabler för att beräkna volymvikten.

I denna rapport testas tidigare publicerade PTF, samt egna framtagna PTF för beräkning av volymvikten, på ett datamaterial bestående av totalt 833 prov från svenska skogsjordar. Dessa prov, vilka tagits från 0.5 cm till 185 cm under markytan, analyserades på bl.a. halten organiskt kol (OC) och volymvikt (BD). Testerna av de olika funktionerna har gjorts dels på hela datamaterialet (n=833), samt uppdelat på prov från mineraljordshorisonter (n=678) och humuslager (n=155). Generellt sett är sambandet bättre mellan volymvikt och halten organiskt kol än mellan volymvikt och markdjup.

Testerna av de olika funktionerna visade att de egna framtagna PTF oftast gav bättre förklaringsgrad än de tidigare publicerade PTF. Om enbart halten organiskt kol (i vikt-% av provets torrsvikt) finns att tillgå som oberoende variabel förordas att följande funktioner används för beräkning av volymvikten i svenska skogsjordar:

Prov från mineraljordshorisonter:

$$BD = 1.7262 * \text{EXP}(-0.3632 * \text{OC}^{0.5})$$

Prov från humuslager:

$$BD = \text{OC} / (-2.1278 + 0.1528 * \text{OC} + 0.2105 * \text{OC}^2)$$

Generell funktion för både mineraljord och humuslager:

$$BD = 1.7587 * \text{EXP}(-0.3865 * \text{OC}^{0.5})$$

I de fall det även finns uppgifter på provdjup kan följande funktioner användas för beräkning av volymvikten:

Prov från mineraljordshorisonter:

$$BD = 1.5463 * \text{EXP}(-0.3130 * \text{OC}^{0.5}) + 0.00207 * \text{provdjup}$$

(där provdjup, i cm, räknas från mineraljordens övre gräns)

Generell funktion för både mineraljord och humuslager:

$$BD = 1.6190 * \text{EXP}(-0.3615 * \text{OC}^{0.5}) + 0.00168 * \text{provdjup}$$

(där provdjup, i cm, räknas från markytan)

Funktionerna där provdjup ingår ökar visserligen förklaringsgraden signifikant med ändå mycket marginellt jämfört med funktionerna där enbart variabeln organiskt kol ingår som oberoende variabel. Medelfelet ökar dessutom något om provdjupet inkluderas i funktionerna.

Summary

Bulk density is an important soil physical property. However, the soil bulk density is not so often determined by taken soil samples, as the sampling can be quite complicated, especially in stony forest soils. The bulk density may however be estimated, for instance by pedo-transfer functions (PTF). In these PTF's soil bulk density is estimated from other measured soil properties, such as carbon content and soil depth.

In this report previous published PTF's from several countries, as well as special elaborated PTF's, were tested for estimation of bulk density by using a dataset of forest soils (833 samples) from Sweden. These samples were analyzed on i.a. the organic carbon content (OC) and bulk density (BD). Sample depth (cm below ground or below the humus layer) was also included in the database. The sample depth varied from 0.5 cm to 185 cm below soil surface. The different PTF's were tested on the entire dataset (n=833), and for samples from mineral soil horizons (n=678) or the humus layer (n=155). Generally, there was a stronger relationship between BD and OC than between BD and depth.

The tests of the different PTF's, showed that the special elaborated PTF's usually fitted better to the Swedish data than earlier published PTF's. If only the organic carbon content (% DW) is used (or accessible) as an independent variable, the following functions are recommended for calculation of bulk density in Swedish forest soils:

Samples from mineral soil horizons:

$$BD = 1.7262 * EXP(-0.3632 * OC^{0.5})$$

Samples from the humus layer:

$$BD = OC / (-2.1278 + 0.1528 * OC + 0.2105 * OC^2)$$

A general function for samples from both mineral soil and humus layer:

$$BD = 1.7587 * EXP(-0.3865 * OC^{0.5})$$

If information on sample depth is also available the following functions can be used:

Samples from mineral soil horizons:

$$BD = 1.5463 * EXP(-0.3130 * OC^{0.5}) + 0.00207 * depth$$

(depth = sample depth, in cm, measured from the top of the mineral soil)

A general function for samples from both mineral soil and humus layer:

$$BD = 1.6190 * EXP(-0.3615 * OC^{0.5}) + 0.00168 * depth$$

(depth = sample depth, in cm, measured from the soil surface; including the humus layer)

The above functions where the depth is included had significant higher coefficient of determination (R^2) than the functions with only organic carbon content as independent variable. However, the increased prediction is quite marginal and the mean error is somewhat higher using the functions with depth included.

Inledning

Volymvikt är en viktig markegenskap och har stor betydelse för markens fysikaliska och kemiska förhållanden. Den påverkar även i hög grad markens biologiska system. Volymvikten kan således bl.a. inverka på markens bördighet, eftersom rotförekomsten eller rötternas expansion påverkas av volymvikt i markens olika horisonter (ex.: Hamilton & Krause, 1985; Strong & La Roi, 1985; Froelich m.fl., 1986; Krizek m.fl., 2003; Hirth m.fl., 2005). Porositet och markstruktur är andra markvariabler som är starkt kopplade till volymvikten. Kännedom om volymvikten behövs dessutom för att, utifrån kända halter av olika ämnen i marken, kunna beräkna mängderna av dessa ämnen i marken.

Det är emellertid ganska ofta som volymvikten inte bestäms vid markprovtagningar, eftersom bestämningen är kostnadskrävande då både själva provtagningen och analysen är komplicerad och tidskrävande. I de svenska skogsjordarna innehåller mineraljorden ofta mycket grovgrus, sten och block vilket kraftigt försvårar provtagningen. Då volymvikten dessutom har en betydande variation horisontellt, men speciellt i vertikalled, krävs många prov för att få fram representativa volymviktsvärden. Kan man få fram bra närmevärden på volymvikten från andra, mer lättanalyserade variabler, reduceras således både arbetsgången och kostnaderna.

Volymvikten (BD) är förhållandet mellan ett provs totala massa (m) och dess totala volym, d.v.s. det fasta materialet inklusive porvolym (V):

$$BD = m/V$$

Inom markläran brukar volymvikten för ett jordprov beräknas genom att väga ett torrt volymsbestämt prov, där partiklar > 2 mm vanligtvis tagits bort. Troedsson & Nykvist (1973) anger således den torra volymvikten som:

$$BD = \text{torrvikten av provet vid } 105\text{ }^\circ\text{C} / \text{volymen i naturlig lagring}$$

Skrymdensitet är en annan vanligt förekommande benämning för volymvikt (ex. Larsson, 1989). På engelska kallas volymvikt för *bulk density* (BD) och eftersom man oftast anger volymvikten enligt Troedsson & Nykvist definition (se ovan), kallar man denna volymvikt för *dry bulk density*.

Det finns flera olika faktorer som är av betydelse för markens volymvikt, bl.a. kornstorleksfördelningen (texturen), halten organiskt material (OM), förekomsten av rötter, block och stenar, markdjup (= på vilket djup jordprovet är taget), packningsgrad m.m. Undersökningar från olika delar av världen har dock visat att det är halten organiskt material eller texturen som oftast är de viktigaste variablerna som styr markens volymvikt (Alexander, 1980, 1989; Manrique & Jones, 1991; Federer m.fl., 1993; Tamminen & Starr, 1994; Bernoux m.fl., 1998; Heuscher m.fl., 2005). I ytliga markskikt är organiskt material den faktor som påverkar volymvikten mest. För jordar eller jordprov med lågt innehåll av organiskt material så påverkas volymvikten i hög grad av texturen (Alexander, 1980; Jones, 1983; Huntington m.fl., 1989; Manrique & Jones, 1991; Heuscher m.fl., 2005).

Speciellt halten organiskt material är en analys som ofta bestäms i markundersökningar genom glödförlust (LOI) eller organiskt kol (OC). Det finns därför många undersökningar där man beräknat volymvikten genom s.k. 'pedo-transfer functions' (PTF) baserade på halterna av OM eller OC (ex. Curtis & Post, 1964; Saini, 1966; Erviö, 1970; Jeffrey, 1970; Adams, 1973;

Alexander, 1980, 1989; Harrison & Bocoock, 1981; Grigal m.fl., 1989; Honeysett & Ratkowsky, 1989; Huntington m.fl., 1989; Manrique & Jones, 1991; Federer m.fl., 1993). Ett flertal olika funktioner har använts och den förklaringsgrad som funktionerna gett har i en del fall varit hög (se bilaga A).

Vissa undersökningar (ex. Eschner m.fl., 1957; Saini, 1966; van Lierop, 1981; Nichols & Boelter, 1984; Manrique & Jones, 1991; Homann m.fl., 1995; Schwärzel m.fl., 2002; Blanco-Canqui m.fl., 2005) har redovisat linjära samband mellan volymvikt och OM eller OC. Halterna av OC eller OM har dock i dessa fall varit ganska låga (vanligtvis < 10 %). Studerar man data från olika undersökningar kan man observera att i ett begränsat intervall, speciellt vid höga eller låga halter av OM/OC är sambandet med volymvikten ofta linjärt. Ett flertal undersökningar har dock visat att över ett större intervall för OM eller OC är sambandet med volymvikten vanligtvis kurvlinjärt (Erviö, 1970; Jeffrey, 1970; Grigal m.fl., 1989; Tamminen & Starr, 1994; Perruchoud m.fl., 2000; Wall & Heiskanen, 2003). Schleier (2000) redovisade dock ett linjärt samband mellan volymvikt och OM för 'mud' och 'mineral post fen soils' där OM varierade mellan ca 5-80 vikt-%.

Några studier har också visat att andra markegenskaper som textur (Heinonen, 1977; Jones, 1983; Rawls, 1983; Bernoux m.fl., 1998; Salifu m.fl., 1999; Leonavičiūtė, 2000; Calhoun m.fl., 2001; Jensen m.fl., 2005), sten- och blockkinnehåll (Stewart m.fl., 1970; Torri m.fl., 1994; Vincent & Chadwick, 1994; van Wesemael m.fl., 2000), provdjup (Calhoun m.fl., 2001), vattenhalt (van Lierop, 1981) och pH (van Lierop, 1981; Bernoux m.fl., 1998) kan användas enskilt eller ihop med OC/OM för att beräkna volymvikten. Alexander (1980), Huntington m.fl. (1989) och Manrique & Jones (1991) har påpekat att texturen är en viktig bestämmande faktor för volymvikten när halten OM är låg. Stratifiering av volymvikten med avseende på ex. jordmånstyp och/eller jordmånshorisont har ibland gjorts för att förbättra sambandet mellan volymvikt och OC/OM (ex. Calhoun m.fl., 2001; Callesen m.fl., 2003).

I denna rapport har volymviktsdata från olika undersökningar i svensk skogsmark sammanställts och tidigare publicerade 'pedo-transfer functions' har testats på detta material. Enligt Schaap m.fl. (1998) bör dock PTF från andra länder kalibreras och testas på datamaterial från det egna landet innan de kan användas. Detta har gjorts i denna rapport och dessutom har helt nya funktioner tagits fram utifrån det svenska datamaterial. I första hand har analyserade värden på organiskt kol använts som 'bestämmande faktor' i de framtagna funktionerna. Även provdjup (cm från markytan eller mineraljordens övre gräns) har testats enskilt eller ihop med organiskt kol för beräkning av volymvikten. Texturdata har inte använts eftersom dessa data bara funnits på en liten del av datamaterialet.

Material och metoder

Datamaterial

Från den nordiska markdatabasen Nordsoil (Raulund-Rasmussen & Callesen, 1999) inhämtades volymviktsvärden och halter på organiskt kol från totalt 484 prov från 66 svenska skogsmarksprofiler. Karlton m.fl. (1995) analyserade bl.a. volymvikt och organiskt kol i 25 skogsmarkprofiler från tre transekter över Sverige. I den senare undersökningen finns totalt 214 prov där både volymvikt och organiskt kol är analyserat. Data på volymvikt och organiskt kol på ytterligare 135 prov från närmare 20 skogsmarkprofiler kunde insamlas från andra undersökningar gjorda vid institutionen för skoglig marklära, SLU. Från dessa olika databaser kunde således ett datamaterial sammanställas på totalt 833 prov med data på både volymvikt och organiskt kol, samt provdjup (från markytan eller från mineraljordens övre gräns). Huvuddelen av proven är tagna i podsoljordar på moränmark och markfuktighetsklasserna frisk mark och torr mark dominerar.

Då datamaterialet omfattar prov från både humuslagret och C-horisonter varierade halten organiskt kol i proven från 0 % upp till 50.16 % av jordprovets torrsubstanshalt. Volymvikten i dessa prov varierade från 0.03 g/cm³ upp till 2.05 g/cm³. Proven var tagna från 0.5 cm till 185 cm under markytan. Medelvärden och spridningsmått för hela datamaterialet, uppdelat på prov från humuslager respektive mineraljord, redovisas i tabell 1.

Tabell 1. Medelvärden, variationsvidd, standardavvikelse (STD) och variationskoefficient (CV) för volymvikt (BD), halt organiskt kol (OC) och medelprovdjup (cm under markytan) för 155 prov från humuslager och 678 prov från mineraljorden. Proven tagna i svensk skogsmark.

Table 1. Mean values, range, standard deviation (STD) and coefficient of variation for bulk density (BD), organic carbon content (OC) and mean of sample depth (Medelprovdjup; cm below soil surface) in soil samples taken in Swedish forest soils.

Variabel Variable	Medel Mean	Variationsvidd Range	STD	CV
<u>Prov från humuslagret – samples from the humus layer (n=155)</u>				
BD (g/cm ³)	0.16	0.03 – 1.01	0.14	83.8
OC (% av t.s.)	36.0	5.79 – 50.2	11.7	32.4
Medelprovdjup (cm)	3.2	0.5 – 11.4	2.10	65.4
<u>Prov från mineraljorden – samples from the mineral soil (n=678)</u>				
BD (g/cm ³)	1.18	0.08 – 2.05	0.30	25.2
OC (% av t.s.)	1.77	0.00 – 28.2	2.86	162
Medelprovdjup (cm)	39.0	1.0 – 185.0	30.1	77.3
<u>Alla prov – all samples (n=833)</u>				
BD (g/cm ³)	0.99	0.03 – 2.05	0.48	48.7
OC (% av t.s.)	8.14	0.00 – 50.2	14.5	178
Medelprovdjup (cm)	32.3	0.5 – 185.0	30.5	94.5

Funktioner från andra undersökningar

Det finns ett stort antal publicerade funktioner för beräkning av volymvikten från andra markvariabler, speciellt halterna av organiskt material (OM) eller organiskt kol (OC), (bilaga 1). Större delen av dessa funktioner har testats på det svenska datamaterialet. Vi har i denna rapport valt att presentera resultatet för några av dessa funktioner, som antingen gav god anpassning till det svenska datamaterialet eller är principiellt intressant.

Vissa av funktionerna använder halten organiskt material (OM) istället för organiskt kol (OC). Genom att multiplicera OC-värdena i databasen med en faktor 2 har vi grovt fått ett värde på OM (% av t.s). De funktioner som beräknar volymvikten (BD) från OC, eller OM, har i princip fem olika utseenden:

$$\begin{aligned}BD &= a + b \cdot OC && \dots \text{ (I)} \\BD &= a + b \cdot \ln(OC) && \dots \text{ (II)} \\ \ln(BD) &= a + b \cdot \ln(OC) && \dots \text{ (III)} \\BD &= 100 / ((OM / K_1) + (100 - OM) / K_2) && \dots \text{ (IV)} \\BD &= a + b \cdot \sqrt{OC} && \dots \text{ (V)}\end{aligned}$$

Funktioner av typ I har oftast låg förklaringsgrad, men kan dock användas i ett snävt OC- eller OM-intervall (ex. för prov med hög OC- eller OM-halt, ex. torv eller humuslager). Eftersom sambandet mellan OC (eller OM) och BD oftast har ett utseende som påminner om en exponentialfunktion så har funktioner av typ II eller III (där halterna av OC eller OM har logaritmerats) vanligtvis en bättre förklaringsgrad än funktioner av typ I. En variant av typ II-funktionen som ofta används är:

$$BD = a + b \cdot \ln(OC) + c \cdot (\ln(OC))^2 \quad \dots \text{ (IIb)}$$

Ytterligare en variant av typ II-funktionen är följande exponentialfunktion:

$$BD = a + b \cdot e^{(c \cdot OC)} \quad \dots \text{ (IIc)}$$

En speciell variant av exponentialfunktionen IIc är följande funktionstyp, som användes av Alexander (1989):

$$BD = a + b \cdot e^{(c \cdot OC^{0.5})} \quad \dots \text{ (IIId)}$$

En vanligare använd variant av typ III-funktionen är

$$\ln(BD) = a + b \cdot \ln(OC) + c \cdot (\ln(OC))^2 \quad \dots \text{ (IIIb)}$$

Vad vi känner till så var Stewart m.fl. (1970) de första med att presentera en funktion av typ IV. Denna funktion kan kallas för en markfysikaliskt baserad komponentmodell, eftersom koefficienterna K_1 och K_2 kan sägas vara volymvikten för rent organiskt material respektive ren mineraljord. En variant av funktion IV har presenterats av Federer (1993), Tremblay m.fl. (2002) och Prévost (2004):

$$BD = (K_1 \cdot K_2) / ((K_2 \cdot OM) + (1 - OM) \cdot K_1) \quad \dots \text{ (IVb)}$$

I de undersökningar där funktioner av typ IV eller IVb tagits fram har K_1 varierat mellan 0.111 – 0.312 g/cm³ och K_2 mellan 1.0 – 1.825 g/cm³. Ytterligare en variant av funktion IV kan följande funktion sägas vara:

$$BD = 1/(a+b*OM) \quad \dots (IVc)$$

I denna funktion är inversen av koefficienten a lika med K_2 (d.v.s. volymvikten för ren mineraljord) och inversen av (a+b*100) är lika med K_1 (d.v.s. volymvikten för rent organiskt material). Funktioner av typ IV, IVb och IVc ger ofta en god förklaringsgrad för jordprov där det finns både organiskt material och mineraljord.

Funktioner av typ V kan även skrivas: $BD = a + b*OC^{0.5}$. Denna typ av funktion ger ofta en god förklaringsgrad och har därför använts i många undersökningar (se bilaga 1).

De funktioner som presenteras här är följande:

Harrison & Bocoock (1981), med data från Sjörs (1961):

$$BD = 1.531 - 0.735*\log(OM) \quad \dots (1)$$

Federer (1983), OM i g/g:

$$\ln BD = -2.314 - 1.0788*\ln OM - 0.1132*(\ln OM)^2 \quad \dots (2)$$

Alexander (1989):

$$BD = 1.827*e^{(-0.121*(OC)^{0.5})} \quad \dots (3)$$

Grigal m.fl. (1989):

Prov från både humuslager och mineraljord:

$$BD = 0.075 + 1.301*e^{(-0.06*OM)} \quad \dots (4)$$

Prov från enbart humuslager:

$$BD = 0.073 + 2.369*e^{(-0.073*OM)} \quad \dots (5)$$

Prov från enbart mineraljord:

$$BD = 0.669 + 0.941*e^{(-0.240*OM)} \quad \dots (6)$$

Huntington m.fl. (1989):

$$\ln BD = -0.263 - 0.147*\ln(OC) - 0.103*(\ln(OC))^2 \quad \dots (7)$$

Honeysett & Ratkowsky (1989):

$$BD = 1 / (0.548 + 0.0588*OM) \quad \dots (8)$$

Federer m.fl. (1993), OM i g/g:

$$BD = (0.111*1.450) / ((1.450*OM) + (1 - OM)*0.111) \quad \dots (9)$$

Tamminen & Starr (1994):

$$BD = 1.565 - 0.2298*(OM)^{0.5} \quad \dots (10)$$

$$BD = 1.667 - 0.2221*(OM)^{0.5} - 0.00107*(\%grus) + 0.04827*\ln(\text{provdjup}) + 0.06046*\ln(\%ler + 1) \quad \dots (11)$$

För funktion 11 (som bara testats på prov från mineraljorden) har vi för proven i det svenska datamaterialet ansatt värdena 25 för vikt-% grus och 3 för vikt-% ler.

Tremblay m.fl. (2002), OM i g/g:

$$BD = (0.120*1.400) / ((1.400*OM) + (1 - OM)*0.120) \quad \dots (12)$$

Callesen m.fl. (2003), OC i mg/g:

$$BD = 1.590 - 0.1045 \cdot (OC)^{0.5} \quad \dots (13)$$

Prevost (2004), OM i g/g:

$$\ln BD = -0.98 - 1.104 \cdot OM - 0.491 \cdot \ln(OM) - 0.043 \cdot (\ln(OM))^2 \quad \dots (14)$$

de Vos m.fl. (2005):

$$BD = 1.775 - 0.173 \cdot (OM)^{0.5} \quad \dots (15)$$

För att testa hur väl de olika funktionerna anpassade sig till det svenska datamaterialet användes dels determinationskoefficienten (R^2) och de tre spridningsmått medelfel (ME), Normalized Mean Absolute Error (NMAE) och Root Mean Square Error (RMSE).

Determinationskoefficienten (R^2) beräknas på följande sätt:

$$R^2 = \frac{SS_T - SS_E}{SS_T}, \text{ där } SS_T = \text{totala kvadratsumman} = \sum_{i=1}^n (BD_{obs} - \overline{BD})^2 \text{ och } SS_E =$$

kvadratsumman inom grupper = $\sum_{i=1}^n (BD_{obs} - BD_{pred})^2$, där BD_{obs} är det observerade volymviktsvärdet, \overline{BD} är medelvärdet för de uppmätta volymviktsvärdena och BD_{pred} är det predikterade värdet för volymvikten. Ju närmare R^2 är 1 desto bättre är modellen.

Medelfelet (ME) beräknades enligt: $ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (BD_{obs} - BD_{pred})$

Normalized Mean Absolute Error (NMAE) beräknades enligt: $NMAE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{BD_{obs} - BD_{pred}}{n} \right|}{\overline{BD}}$

Root Mean Square Error (RMSE), som kan sägas visa medelprecisionen av modellen,

beräknades enligt: $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (BD_{obs} - BD_{pred})^2}{n}}$

Ju närmare ME, NMAE och RMSE är 0, desto bättre är modellen.

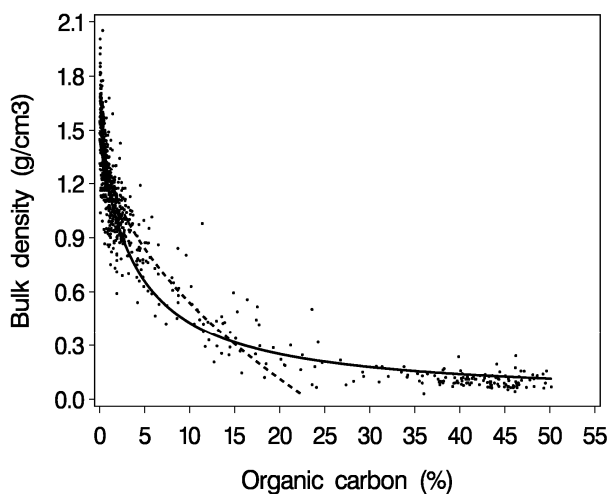
Resultat

Test av tidigare publicerade funktioner

Både humus- och mineraljordsprover

Sambandet mellan halten organiskt kol (OC) och volymvikten (BD) uppvisar ett kurvlinjärt samband om hela datamaterialet tas med. Jämförelse görs även med de funktionssamband mellan BD och OC som Federer (1993) och Tamminen & Starr (1994) presenterat (funktion nr 9 och 10, se sidan 9) (figur 1). Det bör här påpekas att både funktion 9 och 10 (liksom funktionerna 1-2, 4-6, 8, 11-12 och 14-15) är baserade på halten organiskt material (OM) i provet och för att anpassa dessa funktioner till det svenska datamaterialet (med OC som oberoende variabel) har vi grovt ansatt att OM i de svenska proven är dubbelt så hög som uppmätt OC.

För hela det svenska datamaterialet (n=833) visade sig Federer's funktion, nr 9, passa bäst (se R^2 -, ME-, NMAE och RMSE-värden i tabell 2). Att Federer's funktion passar så bra till hela det svenska datamaterialet (med både humus- och mineraljordsprover) beror bl.a. på att denna funktion är framtagen från just humus- och mineraljordsprover, även om dessa prov var tagna i New England, USA (bilaga 1). Tamminen & Starr's funktion (nr 10) passar inte lika bra till hela det svenska datamaterialet, speciellt inte för prov med mer än 20 % OC (figur 1, tabell 2), beroende på att deras funktion är baserad på mineraljordsprover.



Figur 1. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i svenska skogsjordar (prover från både humuslager och mineraljord, n=833). Funktion 9 (Federer, 1993) och funktion 10 (Tamminen & Starr, 1994) är inritade som heldragen resp. streckad kurva.
Figure 1. Relationship between organic carbon content and bulk density in Swedish forest soils (all soil samples, n= 833). Solid curve = function 9 (Federer, 1993), broken curve = function 10 (Tamminen & Starr, 1994).

Av tabell 2 framgår att de flesta funktionerna ger en mycket god förklaringsgrad för hela det svenska datamaterialet (n=833). Federer's funktion (nr 9), liksom funktionerna nr 8 (Honeysett & Ratkowsky, 1989) och nr 12 (Tremblay m.fl., 2002) förklarar nästan 91 % av variationen i datamaterialet. Funktionerna 3, 4 och 14 förklarar drygt 89 % av variationen. Funktion nr 9 har genomgående även låga värden på spridningsmått, d.v.s. ger en god anpassning till uppmätta värden. Även funktionerna nr 4, 12 och 14 har låga värden på spridningsmått. Funktion nr 8 däremot har, trots ett högt R^2 -värde, relativt höga värden på spridningsmått ME, NMAE och RMSE.

Det positiva värdet på medelfelet för funktion 9 (tabell 1) visar att denna funktion i medeltal ger ett något för lågt beräknat värde på volymvikten i förhållande till uppmätt volymvikt.

Detta beror till stor del på att den beräknade volymvikten från funktion 9 kan maximalt bli 1.450, vilket är ett för lågt värde för prov från djupa markskikt i Sverige (figur 2).

Tabell 2. Jämförelse av uppmätt volymvikt och beräknad volymvikt genom funktionerna 1-14, med avseende på determinationskoefficienten (R^2), spridningsmåttet medelfel (ME), normalized mean absolute error (NMAE) och root mean square error (RMSE).

Table 2. Evaluation of measured and estimated bulk density, using the functions 1-14, by comparing the coefficient of variation (R^2), mean predicted error (ME), normalized mean absolute error (NMAE) and root mean square error (RMSE).

Funktion	R^2	ME	NMAE	RMSE
----------	-------	----	------	------

Alla prov (n=833), medel uppmätt volymvikt = 0.995

All samples (n=833), mean of measured bulk density = 0.995

1	0.871	-0.148	0.182	0.266
2	0.770	0.102	0.160	0.253
3	0.893	-0.477	0.483	0.527
4	0.891	0.020	0.118	0.161
7	0.740	0.412	0.419	0.509
8	0.909	-0.222	0.235	0.279
9	0.909	0.050	0.118	0.157
10	0.860	0.082	0.202	0.289
12	0.909	0.060	0.124	0.163
13	0.860	0.068	0.206	0.294
14	0.897	-0.065	0.129	0.169
15	0.860	-0.290	0.300	0.345

Mineraljordsprov (n=678), medel uppmätt volymvikt = 1.185

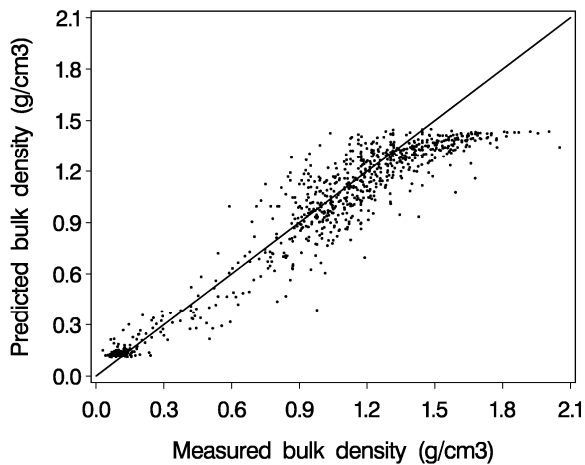
Mineral soil samples (n=678), mean of measured bulk density = 1.185

1	0.680	-0.175	0.177	0.292
2	0.348	0.125	0.156	0.279
3	0.729	-0.417	0.355	0.462
4	0.667	0.017	0.113	0.175
6	0.702	-0.038	0.107	0.167
7	0.261	0.500	0.423	0.562
8	0.719	-0.255	0.225	0.306
9	0.722	0.064	0.112	0.170
10	0.708	-0.017	0.107	0.163
11	0.726	-0.110	0.130	0.192
12	0.718	0.079	0.116	0.177
13	0.708	-0.036	0.109	0.165
14	0.679	-0.065	0.118	0.181
15	0.708	-0.317	0.274	0.363

Humusprov (n=155), medel uppmätt volymvikt = 0.162

Samples from humus layer (n=155), mean of measured bulk density = 0.162

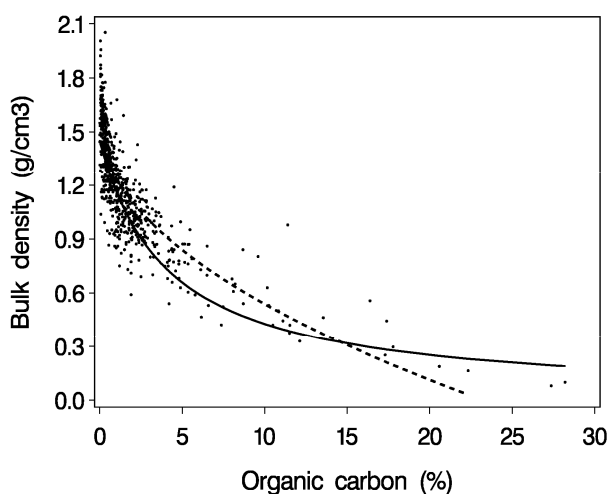
1	0.696	-0.030	0.361	0.086
2	0.744	-0.001	0.293	0.074
3	0.672	-0.742	4.588	0.746
4	0.748	0.030	0.295	0.075
5	0.743	0.020	0.319	0.079
7	0.736	0.025	0.308	0.091
8	0.743	-0.079	0.564	0.104
9	0.746	-0.011	0.321	0.075
10	0.644	0.513	3.258	0.578
12	0.743	-0.024	0.352	0.077
13	0.644	0.520	3.307	0.587
14	0.717	-0.068	0.501	0.100
15	0.644	-0.171	1.121	0.251



Figur 2. Uppmätt volymvikt mot beräknad volymvikt för humus- och mineraljordsprov från svenska skogsjordar. De beräknade volymvikterna erhöles från funktion 9. Helledragen linje markerar 1:1 förhållandet.
Figure 2. Observed versus estimated bulk density for samples from humus layer or mineral soil in Swedish forest soils. The estimated bulk density values were obtained from function 9 (Federer, 1993). Solid curve shows the 1:1 relationship.

Enbart mineraljordsprover

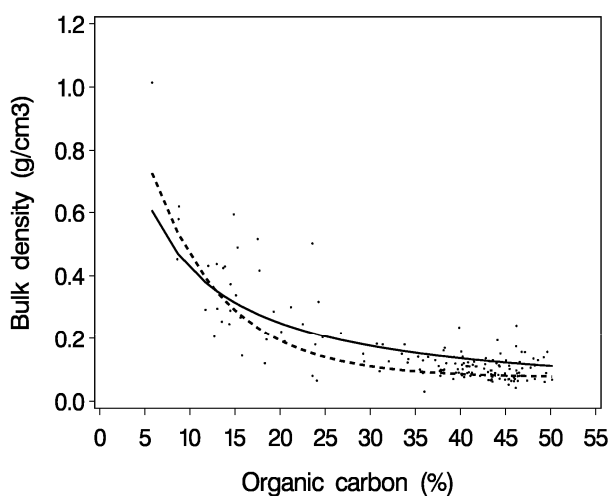
För enbart mineraljordsproven ($n=678$) har vi även använt funktion nr 11 och då ansatt fasta värden för andelarna grus och ler; 25 % resp. 3 %. Funktionerna 3, 11 och 9 ger de bästa förklaringsgraderna för detta dataset (tabell 2). Funktion 3 som gav det högsta R^2 -värdet ger dock en överskattning av volymvikten i de flesta fall och således ett högt negativt medelfel. De lägsta absolutvärdena på medelfelet ger funktionerna 4 och 10. Att funktion 4 har ett lågt absolutvärde på medelfelet beror på att spridningen av beräknad volymvikt är jämn kring 1:1-linjen. Spridningen är dock mycket stor, vilket visar att medelfelet inte är ett bra spridningsmått för just denna jämförelse. Determinationskoefficienten (R^2) för funktion 4 är dessutom bland de lägsta. Funktion 10 har genomgående de lägsta värdena på spridningsmåten. En jämförelse av funktion 9 och 10 visar dock att funktion 9 ger en något bättre anpassning till datamaterialet än funktion 10 (figur 3 och tabell 2). Det höga R^2 -värdet för funktion 9, samtidigt som funktionen har låga värden på spridningsmåten visar att denna funktion är den bästa att använda av funktionerna 1-15 även för mineraljordsproven (tabell 2).



Figur 3. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i mineraljord från svenska skogsjordar. Funktion 9 (Federer, 1993) och funktion 10 (Tamminen & Starr, 1994) är inritade som helledragen resp. streckad kurva.
Figure 3. Relationship between organic carbon content and bulk density in the mineral soil of Swedish forest land ($n=678$). Solid curve = function 9 (Federer, 1993), broken curve = function 10 (Tamminen & Starr, 1994).

Enbart humusprover

För humusproven (n=155) är det funktionerna 4, 9, 2, 5, 8 och 12 som ger bäst anpassning till datamaterialet. Dessa funktioner förklarar nästan 75 % av variationen i datamaterialet. De övriga funktionerna förklarar mellan drygt 64 upp till nästan 74 % av variationen. Spridningsmåttan ME, NMAE och RMSE ger även låga värden för dessa funktioner, utom funktion 8 som ger ett något högt värde på NMAE. Man kan dock säga att dessa funktioner ger en relativt bra anpassning till de uppmätta värdena (tabell 2). De skilda funktionerna ger dock förhållandevis olika värden på volymvikten. Jämförs funktionerna 4 och 9, ses att för prov med hög organisk halt ger funktion 4 ofta en viss underskattning av volymvikten, medan funktion 9 i detta intervall istället ofta ger en viss överskattning av volymvikten (figur 4).



Figur 4. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i humuslager från svenska skogsjordar. Funktion 9 (Federer, 1993) och funktion 4 (Grigal m.fl., 1989) är inritade som heldragen resp. streckad kurva.

Figure 4. Relationship between organic carbon content and bulk density in the humus layer from Swedish forest soils (n= 155). Solid curve = function 9 (Federer, 1993), broken curve = function 4 (Grigal et al., 1989).

Nya funktioner beräknade från det svenska datamaterialet

Sammantaget visar ovanstående beräkningar att Federer's funktion (nr 9) är den, av de olika funktioner som testats, som oftast passar bäst till det svenska datamaterialet. Vid mycket låga halter av organiskt kol (som är fallet på större djup i mineraljorden) ger dock denna funktion för låga värden på volymvikten och är då inte lämplig (figur 2). Nya funktioner (vars grundfunktioner oftast varit av samma typ som ovan redovisats) har därför tagits fram för att få modeller som kan ge en bättre uppskattning av volymvikten för svenska skogsjordar.

Samband mellan volymvikt och kolhalt samt markdjup

Korrelationen mellan volymvikt och halten organiskt kol, samt provdjup var hög i det svenska datamaterialet. För hela datamaterialet (n=833) var korrelationen -0.860 mellan volymvikt och halten organiskt kol (OC), samt 0.721 mellan volymvikt och provdjup. Transformerades variablerna OC och provdjup genom logaritmering eller genom att ta kvadratrotsvärdet ökade korrelationen med volymvikten, speciellt för provdjup (tabell 3).

I mineraljorden (n=678) var korrelationen mellan volymvikt och djup (räknat från mineraljordens övre gräns) lika med 0.688. Transformerings av värdena för provdjup ökade korre-

lationen något. För samma datamaterial (n=678) var korrelationen mellan volymvikt och halten organiskt kol = -0.712. Om värdena för halten organiskt kol (OC) transformerades ($\ln(\text{OC})$ eller $\text{OC}^{0.5}$) ökade korrelationen med volymvikten påtagligt (tabell 3).

Tabell 3. Sambandet mellan volymvikt (BD, i g/cm^3) och halten organiskt kol (OC, i vikt-% av torrs substans) samt provdjup (z, i cm), uttryckt i korrelationskoefficient (r) för 833 prov från svenska skogsjordar.

Table 3. Correlation between bulk density (BD, in g/cm^3) and organic carbon content (OC, in % weight of dry substance) and sample depth (z, in cm) for 833 soil samples from Swedish forest soils..

	OC	1/OC	$\text{OC}^{0.5}$	$\ln(\text{OC})$	z	$z^{0.5}$	$\ln(z)$
<u>Hela datamaterialet (n=833)</u>							
<u>All data (n=833)</u>							
BD	-0.860	0.096	-0.927	-0.933	0.721	0.820	0.876
<u>Enbart mineraljord (n=678), (provdjup räknat från mineraljordens övre gräns)</u>							
<u>Only mineral soil (n=678), (sample depth measured from top of mineral soil)</u>							
BD	-0.712	0.102	-0.842	-0.825	0.688	0.723	0.707
<u>Enbart humuslagret (n=155)</u>							
<u>Only humus layer (n=155)</u>							
BD	-0.769	0.876	-0.802	-0.834	0.487	0.472	0.438

För humuslagret (n=155) var korrelationen mellan volymvikt och provdjup signifikant trots begränsat djupintervall. Transformerings av värdena för provdjup ökade inte korrelationen med volymvikten. Mellan volymvikt och halten organiskt kol var dock korrelationen betydligt högre (tabell 3).

Ett stort antal funktioner med dessa transformerings och andra testades dels på hela datamaterialet, samt för datamaterialet uppdelat i humuslager (n=155) och mineraljord (n=678).

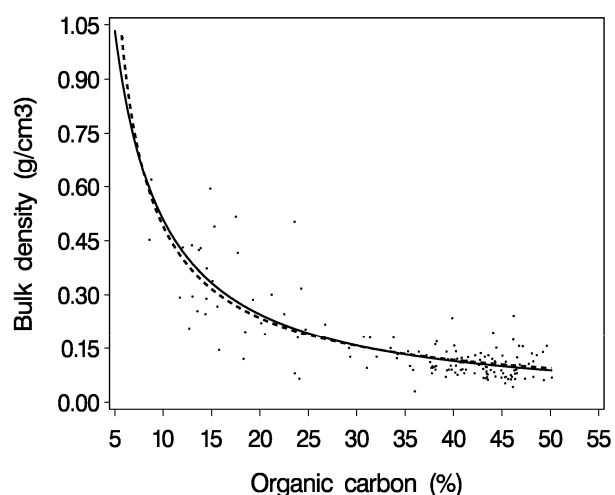
Funktioner för humuslagret

Funktioner med bara halten organiskt kol eller provdjup som oberoende variabler testades liksom funktioner där både halten organiskt kol och provdjup ingick. De bästa sambanden erhöles med halten organiskt kol (OC) som oberoende transformerad variabel (se tabell 3). Tillfördes provdjup (otransformerad eller transformerad) till funktionen ökade förklaringsgraden mycket lite eller inte alls. För att beräkna BD i humuslagret räcker det således att använda OC som oberoende variabel.

De funktioner som gav den bästa förklaringsgraden var:

$$\begin{aligned} \text{BD} &= -0.0182 + 5.2558/\text{OC} && \dots (16) \\ \text{BD} &= 1/(-0.2667 + 0.2254 \cdot \text{OC}) && \dots (17) \\ \text{BD} &= \text{OC}/(-2.1278 + 0.1528 \cdot \text{OC} + 0.2105 \cdot \text{OC}^2) && \dots (18) \\ \text{BD} &= (6.8798 \cdot \text{OC}^{-1.1460}) \cdot (1.0032^{\text{OC}}) && \dots (19) \\ \text{BD} &= (-0.4265 + 0.2505) \cdot \text{OC}^{-0.9531} && \dots (20) \\ \text{BD} &= 1/(-0.4053 + 0.2677 \cdot \text{OC}^{0.9543}) && \dots (21) \end{aligned}$$

Funktion 18 hade den bästa förklaringsgraden och relativt låga värdena på de olika spridningsmåten (tabell 4). Skillnaden i utfallet mellan dessa sex funktioner är dock så liten ($<\pm 8\%$), att vilken som helst av dessa funktioner kan användas (figur 5).



Figur 5. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i humuslager från svenska skogsjordar. Heldragen kurva = funktion 16, streckad kurva = funktion 18.

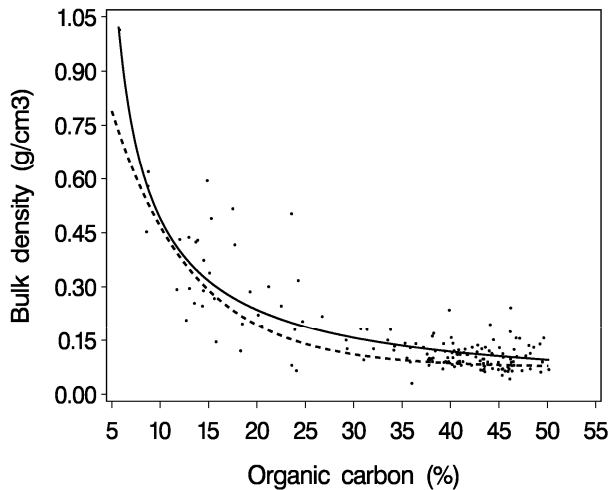
Figure 5. Relationship between organic carbon content and bulk density in humus layers of Swedish forest soils ($n=155$). Solid curve = function 16, broken curve = function 18.

Tabell 4. Jämförelse av uppmätt volymvikt och beräknad volymvikt för humusprov ($n=155$) genom funktionerna 16-21, med avseende på determinationskoefficienten (R^2) och spridningsmåten medelfel (ME), "normalized mean absolute error" (NMAE) och "root mean square error" (RMSE).

Table 4. Evaluation of measured and estimated bulk density for humus samples ($n=155$), using the functions 16-21, by comparing the coefficient of variation (R^2), mean predicted error (ME), normalized mean absolute error (NMAE) and root mean square error (RMSE).

Funktion	R^2	ME	NMAE	RMSE
(16)	0.767	-0.00004	0.261	0.065
(17)	0.770	0.00016	0.259	0.065
(18)	0.772	-0.00135	0.262	0.065
(19)	0.769	-0.00006	0.260	0.065
(20)	0.771	-0.00060	0.260	0.065
(21)	0.771	-0.00055	0.260	0.065

En jämförelse av funktion 18 med den funktion som Grigal m.fl. (1989) publicerade (kallad funktion 4 i denna rapport och som gav den högsta förklaringsgraden av de publicerade funktionerna på det svenska datamaterialet, se tabell 2 och figur 4) visar en högre förklaringsgrad för funktion 18 jämfört med funktion 4; $R^2 = 0.772$ resp. 0.748 (figur 6).



Figur 6. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i humuslager från svenska skogsjordar. Heldragen kurva = funktion 18, streckad kurva = funktion 4 (Grigal m.fl., 1989).
Figure 6. Relationship between organic carbon content and bulk density in the humus layer from Swedish forest soils. Solid curve = function 18, broken curve = function 4; Grigal et al., 1989.

Funktioner för mineraljorden

Följande funktioner gav den bästa förklaringsgraden för prov från mineraljorden (z = provdjup i cm):

$$BD = 1.5953 / (1 + 1.0199 \cdot OC)^{1/2.4588} \quad \dots (22)$$

$$BD = (1.6595 + 2.3939 \cdot OC) / (1 + 2.1839 \cdot OC + 0.2229 \cdot OC^2) \quad \dots (23)$$

$$\ln(BD) = 0.1666 - 0.2348 \cdot \ln(OC) - 0.0458 \cdot \ln(OC^2) \quad \dots (24)$$

$$BD = (0.3172 + 0.3235 \cdot OC)^{-1/2.4588} \quad \dots (25)$$

$$BD = 1 / (0.6012 + 0.2333 \cdot OC^{0.6861}) \quad \dots (26)$$

$$BD = 1.1972 \cdot OC^{**}(-0.1897 \cdot OC^{**}0.2334) \quad \dots (27)$$

$$BD = 1.7262 \cdot \text{EXP}(-0.3632 \cdot OC^{0.5}) \quad \dots (28)$$

$$BD = (OC / (0.00001 + 3 \cdot OC + 50 \cdot OC^2)) - (OC^{0.5} / 100) + 1.7262 \cdot \text{EXP}(-0.3632 \cdot OC^{0.5}) \quad \dots (29)$$

$$BD = 1.3980 - 0.27629 \cdot OC^{0.5} + 0.0028 \cdot z \quad \dots (30)$$

$$BD = 1.5463 \cdot \text{EXP}(-0.3130 \cdot OC^{0.5}) + 0.00207 \cdot z \quad \dots (31)$$

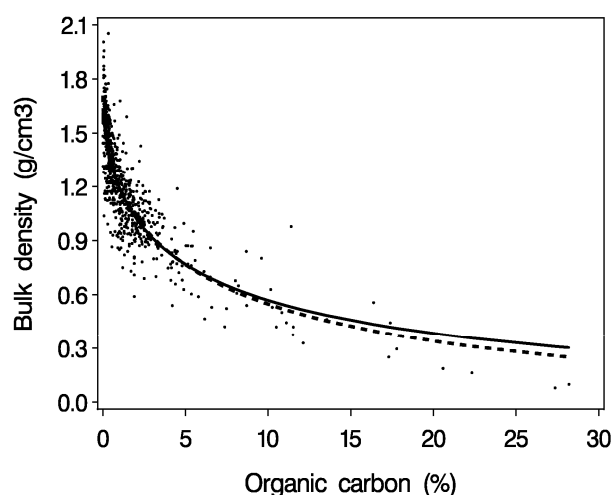
$$BD = 0.00211 \cdot z + (1.474 + 2.8813 \cdot OC) / (1 + 2.581 \cdot OC + 0.2733 \cdot OC^2) \quad \dots (32)$$

Av de funktioner som enbart har halten organiskt kol (OC) som oberoende variabel hade funktion 23 den bästa förklaringsgraden, följd av funktionerna 27 och 28. De olika spridningsmått visade att skillnaden var liten mellan funktionerna 27 och 28, men också att dessa funktioner passade bättre till datamaterialet än funktion nr 22 (tabell 5). Då funktion 28 ger något lägre värde på volymvikten än funktion 27 vid höga värden på OC (figur 7), samt att det maximala värdet på volymvikten blir något högre med funktion 28 vid riktigt låga värden på halten organiskt kol, föreslår vi att funktion 28 används om bara OC finns som oberoende variabel.

Tabell 5. Jämförelse av uppmätt volymvikt och beräknad volymvikt, för mineraljordsprover (n=678) genom funktionerna 22-32, med avseende på determinationskoefficienten (R^2) och spridningsmåttet medelfel (ME), normalized mean absolute error (NMAE) och root mean square error (RMSE).

Table 5. Evaluation of measured and estimated bulk density for mineral soil samples (n=678), using the functions 22-32, by comparing the coefficient of variation (R^2), mean predicted error (ME), normalized mean absolute error (NMAE) and root mean square error (RMSE).

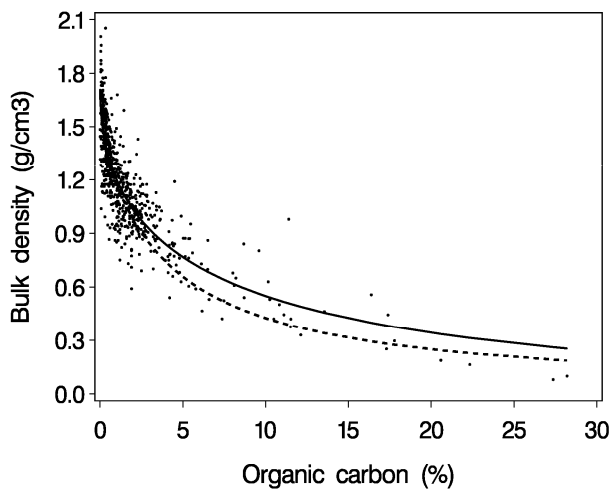
Funktion	R^2	ME	NMAE	RMSE
22	0.735	-0.0005	0.099	0.153
23	0.744	-0.0006	0.097	0.151
24	0.726	0.0084	0.101	0.159
25	0.735	-0.0004	0.099	0.153
26	0.739	-0.0004	0.098	0.152
27	0.742	-0.0003	0.098	0.151
28	0.741	-0.0001	0.098	0.152
29	0.734	-0.0252	0.100	0.161
30	0.760	0.0000	0.094	0.146
31	0.764	-0.0005	0.094	0.145
32	0.765	-0.0005	0.093	0.144



Figur 7. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i mineraljordsprov från svenska skogsjordar. Heldragen kurva = funktion 27, streckad kurva = funktion 28.

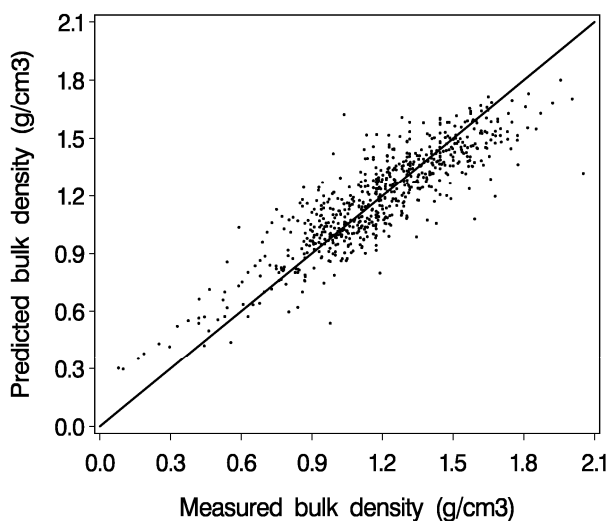
Figure 7. Relationship between organic carbon content and bulk density in mineral soil samples from Swedish forest soils. Solid curve = function 27, broken curve = function 28.

Den av de publicerade funktionerna 1-15, med halten organiskt material (OM) eller halten organiskt kol (OC) som oberoende variabel, som passade bäst för de svenska mineraljordarna var funktion 9 (publicerad av Federer, 1993) med ett R^2 -värde på 0.722. Detta R^2 -värde är något lägre än vad funktion 28 gav för samma material: 0.741. För det svenska datamaterialet ger Federers funktion (nr 9) något låga värden på volymvikten i mineraljorden vid höga värden på halten organiskt kol (figur 8).



Figur 8. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i mineraljordsprov från svenska skogsjordar. Heldragen kurva = funktion 28, streckad kurva = funktion 9 (Federer, 1993).
Figure 8. Relationship between organic carbon content and bulk density in mineral soil samples from Swedish forest soils. Solid curve = function 28, broken curve = function 9; Federer, 1993.

Finns även värden på provdjup (z i cm, räknat från mineraljordens övre gräns) kan funktionerna 30 – 32 användas. Av dessa tre funktioner har funktion 32 den bästa förklaringsgraden. Skillnaden mellan funktionerna med avseende på förklaringsgrad och spridningsmått är dock liten (tabell 5). Funktion 30 ger negativa värden på volymvikten om halten organiskt kol är större än 25.6 vikt-% och provdjupet är litet. Funktion 31 har färre antal konstanter jämfört med funktion 32 och förordas därför. Plottas beräknade värden för volymvikten enligt funktion 31 mot uppmätta värden på volymvikten ser man att funktionen ger en bra prediktion av volymvikten över större delen av mätintervallet (figur 9).



Figur 9. Uppmätt volymvikt mot beräknad volymvikt för mineraljordsprov från svenska skogsjordar. De beräknade volymvikterna erhöles från funktion 31. Hildragen linje markerar 1:1 förhållandet.
Figure 9. Observed versus estimated bulk density for mineral soils. The estimated bulk density values were obtained from function 31. Solid curve shows the 1:1 relationship.

Funktioner för jordprov från humuslager och mineraljord

Följande nio funktioner hade de högsta förklaringsgraderna av de funktioner, med enbart halten organiskt kol (OC) som oberoende variabel, som testades på datamaterialet där alla prov ($n=833$) ingick:

$$BD = 1 / (0.6589 + 0.1526 \cdot OC) \quad \dots (33)$$

$$BD = 100 / ((OC / 0.0628) + ((100 - OC) / 1.5177)) \quad \dots (34)$$

$$BD = (1.6630 + 5.0303 \cdot OC) / (1 + 3.9293 \cdot OC + 0.6409 \cdot OC^2) \quad \dots (35)$$

$$\ln(BD) = 0.2018 - 0.3148 \cdot \ln(OC) - 0.0850 \cdot \ln(OC)^2 \quad \dots (36)$$

$$BD = 1.7587 \cdot \exp(-0.3865 \cdot OC^{0.5}) \quad \dots (37)$$

$$BD = 1.2853 \cdot OC^{-0.0772} \cdot 0.9332^{OC} \quad \dots (38)$$

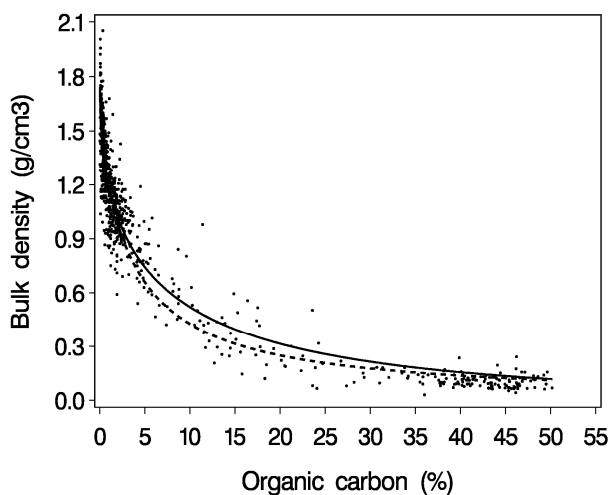
$$BD = (0.6518 + 0.1565 \cdot OC)^{-1/1.0223} \quad \dots (39)$$

$$BD = 1 / (0.6430 + 0.1763 \cdot OC^{0.9177}) \quad \dots (40)$$

$$BD = 1.2094 \cdot OC^{**}(-0.1974 \cdot OC^{**0.2905}) \quad \dots (41)$$

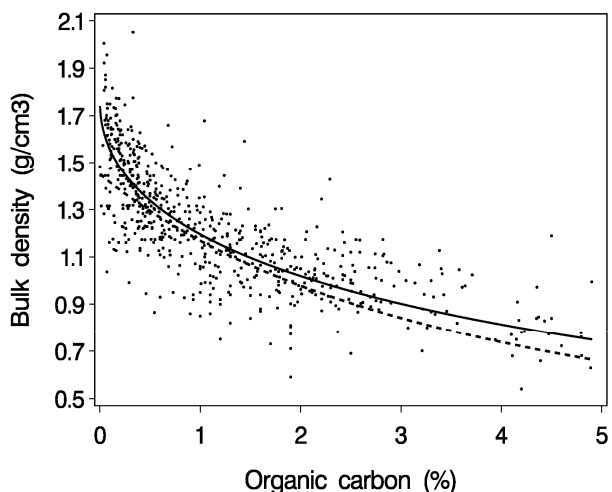
Funktion 37 hade den högsta förklaringsgraden och hade också ofta det lägsta värdet för de olika spridningsmått (tabell 6). Om således bara halten organiskt kol finns som oberoende variabel förordar vi att man använder funktion 37 för beräkning av volymvikten.

Av de publicerade funktionerna så passade Federers funktion (nr 9) bäst på hela det svenska datamaterialet ($R^2 = 0.908$). Förklaringsgraden för Federers funktion är således obetydligt sämre än vår bästa framtagna funktion 37, som gav ett R^2 -värde på 0.915. En jämförelse mellan dessa två funktioner på det svenska datamaterialet visar också att Federers funktion är användbar (figur 10). Nackdelen med Federers funktion är dock att det beräknade värdet på volymvikten kan högst bli 1.45 g/cm^3 , vilket är för lågt för många djupa mineraljords-horisonter i svensk skogsmark. De beräknade värden på volymvikten från funktion 37 kan däremot bli 1.76 g/cm^3 som högst (figur 11), men för höga värden på halten organiskt kol (= prov från humuslager) ger funktion 37 ofta för höga värden på beräknad volymvikt (figur 10).



Figur 10. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i humus- och mineraljordsprov från svenska skogsjordar. Heldragen kurva = funktion 37, streckad kurva = funktion 9 (Federer, 1993).

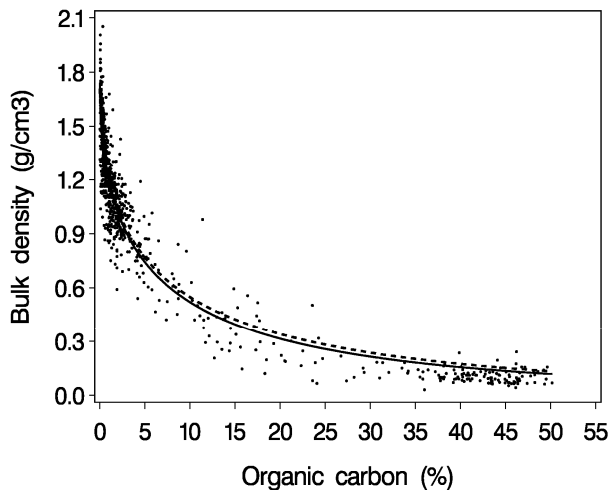
Figure 10. Relationship between organic carbon content and bulk density in humus and mineral soil samples from Swedish forest soils. Solid curve = function 37, broken curve = function 9; Federer, 1993.



Figur 11. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i prov från svenska skogsjordar i intervallet 0-5 % för organiskt kol. Helderiga kurva = funktion 37, streckad kurva = funktion 9 (Federer, 1993).

Figure 11. Relationship between organic carbon content and bulk density in soil samples from Swedish forest soils, with organic carbon content between 0-5 %. Solid curve = function 37, broken curve = function 9; Federer, 1993.

Funktionerna 37 och 28 är ganska lika, men framtagna från olika delar av datamaterialet, d.v.s. hela datamaterialet (n=833) resp. för prover från mineraljordshorisonter (n=678). En jämförelse av utfallet från de båda funktionerna visar att funktion 28 ger högre värden på volymvikten än funktion 37 vid höga värden på halten organiskt kol (figur 12). Skillnaden i utfallet mellan funktionerna är litet vid låga värden på halten organiskt kol. Därför kan funktion 37 rekommenderas även för enbart mineraljordsprover. För prov från humuslager förordas dock funktion 18.



Figur 12. Sambandet mellan halten organiskt kol och volymvikten i humus- och mineraljordsprover från svenska skogsjordar. Heldragen kurva = funktion 37, streckad kurva = funktion 28.

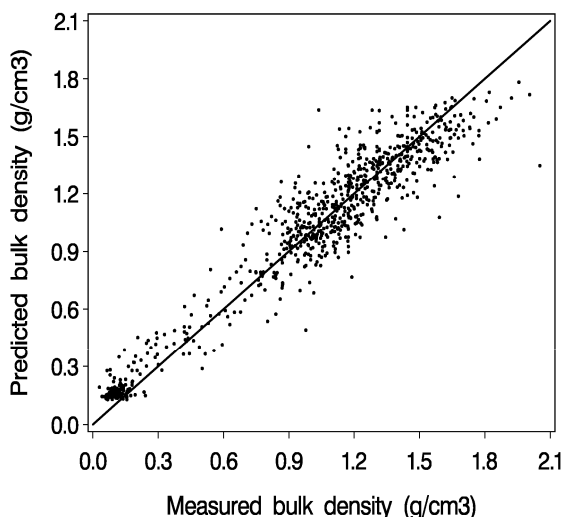
Figure 12. Relationship between organic carbon content and bulk density in humus and mineral soil samples from Swedish forest soils. Solid curve = function 37, broken curve = function 28.

Har man även tillgång till markdjup (z), mätt från markytan, kan följande två funktioner användas för prov från antingen humuslager eller mineraljord:

$$BD = 1.6190 \cdot \text{EXP}(-0.3615 \cdot \text{OC}^{0.5}) + 0.00168 \cdot z \quad \dots (42)$$

$$BD = (1.4614 + 8.1688 \cdot \text{OC}) / (1 + 6.4680 \cdot \text{OC} + 1.0582 \cdot \text{OC}^2) + 0.00216 \cdot z \quad \dots (43)$$

Införandet av markdjup i funktionerna ökar förklaringsgraden med drygt en procent, vilket är ganska marginellt. Funktion 43 har något högre förklaringsgrad än funktion 42. Av de fyra spridningsmått har de två funktionerna lika många lägstanoteringar (tabell 6). Eftersom funktion 42 har färre konstanter i ekvationen än funktion 43 förordas funktion nr 42. Både funktion 42 och funktion 43 ger dock för höga beräknade värden på volymvikten när halten organiskt kol är hög, d.v.s. vid låga uppmätta volymviktsvärden (visas för funktion 42 i figur 13).



Figur 13. Uppmätt volymvikt mot beräknad volymvikt för humus- och mineraljordsprover från svenska skogsjordar. De beräknade volymvikterna erhöles från funktion 42. Helderagen linje markerar 1:1 förhållandet.

Figure 13. Observed versus estimated bulk density for humus and mineral soil samples from Swedish forest soils. The estimated bulk density values were obtained from function 42. Solid curve shows the 1:1 relationship.

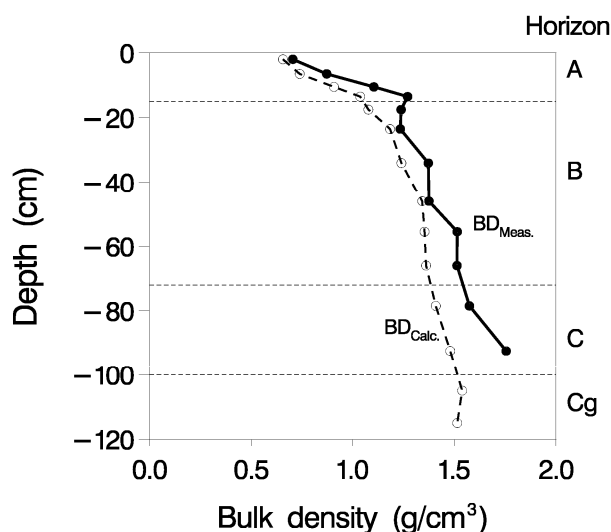
Tabell 6. Jämförelse av uppmätt volymvikt och beräknad volymvikt för jordprov från svenska skogsjordar (n=833) genom funktionerna 33-43, med avseende på determinationskoefficienten (R^2) och spridningsmått medelfel (ME), normalized mean absolute error (NMAE) och root mean square error (RMSE).

Table 6. Evaluation of measured and estimated bulk density for humus and mineral soil samples from Swedish forest soils (n=833), using the functions 33-43, by comparing the coefficient of variation (R^2), mean predicted error (ME), normalized mean absolute error (NMAE) and root mean square error (RMSE).

Funktion	R^2	ME	NMAE	RMSE
33	0.909	-0.0020	0.110	0.146
34	0.909	-0.0019	0.110	0.146
35	0.914	-0.0062	0.109	0.143
36	0.871	-0.0007	0.136	0.185
37	0.915	-0.0038	0.107	0.142
38	0.910	0.0058	0.110	0.146
39	0.909	-0.0023	0.110	0.146
40	0.910	-0.0050	0.111	0.146
41	0.914	-0.0026	0.106	0.142
42	0.920	-0.0052	0.105	0.138
43	0.921	-0.0064	0.105	0.137

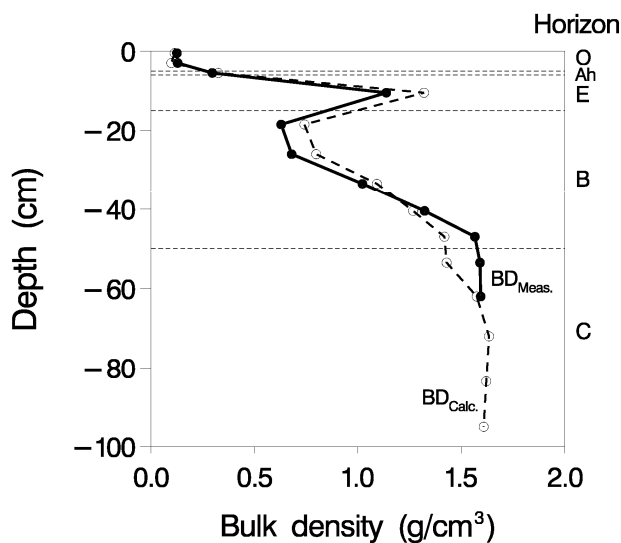
Jämförelse av uppmätt och beräknad volymvikt i enskilda markprofiler

En jämförelse av uppmätta volymvikter och beräknade volymvikter med funktion 37 har gjorts för tre olika markprofiler (figur 14a-c). I brunjordsprofilen från Hässlen (Garpenberg, sydöstra Dalarna) är de beräknade volymvikterna något för låga genom hela profilen (figur 14 a). Skillnaden mellan uppmätt och beräknad volymvikt är som mest 15 %. I podsolprofilen från Kloten (Västmanland) är de beräknade volymvikterna för låga eller för höga på olika nivåer i profilen (figur 14 b). Den procentuella skillnaden mellan uppmätt och beräknad volymvikt är i denna profil vanligtvis mindre än 15 %. I det djupast tagna provet är dock skillnaden nästan 25 %. Värdet på den uppmätta volymvikten verkar dock vara något låg för detta djup.



Figur 14a. Uppmätt (heldragen kurva) och beräknad (streckad kurva) volymvikt för en markprofil i en brunjord, Hässlen, Dalarna. Den beräknade volymvikten framtoogs med funktion nr 37.

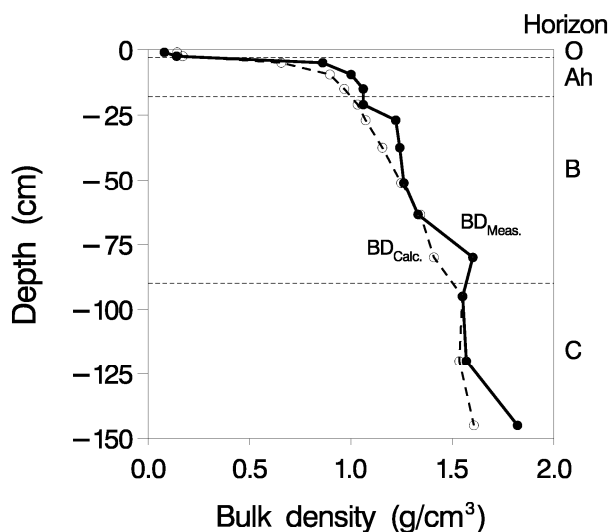
Figure 14a. Observed bulk density (solid curve) and estimated bulk density (broken curve) for a soil profile in a Cambisol at Hässlen in the south of county Dalarna, Sweden. The estimated bulk density values were obtained from function 37.



Figur 14b. Uppmätt (heldragen kurva) och beräknad (streckad kurva) volymvikt för en markprofil i en podsol, Kloten, Västmanland. Den beräknade volymvikten framtoogs med funktion 37.

Figure 14b. Observed bulk density (solid curve) and estimated bulk density (broken curve) for a soil profile in a Podsol at Kloten in the of county Västmanland, Sweden. The estimated bulk density values were obtained from function 37.

De beräknade volymvikterna i en Regosolprofil från Söderåsen är något för höga i humuslagret, medan något låga värden beräknas för mineraljorden (figur 14c). Skillnaden mellan uppmätt och beräknad volymvikt i denna profil är dock i de flesta fall mindre än 10 %.



Figur 14c. Uppmätt (heldragen kurva) och beräknad (streckad kurva) volymvikt för en markprofil i en Regosol på Söderåsen, Skåne. Den beräknade volymvikten är framtagen med funktion 37.

Figure 14c. Observed bulk density (solid curve) and estimated bulk density (broken curve) for a soil profile in a Regosol at Söderåsen in the of county Skåne, Sweden. The estimated bulk density values were obtained from function 37.

Diskussion och slutsats

De flesta pedotransferfunktioner som framtagits för beräkning av volymvikten bygger på att halten organiskt material (OM) eller organiskt kol (OC) utgör en av eller den enda oberoende variabeln. Vid beräkning av kolmängden i marker, där värden på volymvikten saknas men kan beräknas ut kolhalten, kan det tyckas vara olämpligt att behöva använda kolhalten två gånger under beräkningen. I de flesta marker finns det dock ingen annan uppmätt variabel som har så hög korrelation med volymvikten att de kan användas istället för kolhalten. När halten OM är låg utgör texturen ofta en viktig faktor för beräkning av volymvikten (Alexander, 1980; Huntington m.fl., 1989; Manrique & Jones, 1991). Texturuppgifter saknas dock ofta och då kan beräkningen inte utföras. Markdjup används vanligen inte som oberoende variabel vid beräkning av volymvikten, delvis beroende på att man ofta använder fasta provdjup (ex. 0-10, 10-20 cm o.s.v.) och att antalet provdjup ofta är litet (1-3). Vid få och fasta provdjup är det bättre att stratifiera datamaterialet på just markdjup. I vår studie har vi stratifierat materialet i två grupper; prov från humuslagret och prov från mineraljorden. Det är ganska få studier som tagit fram funktioner för enbart humuslagret. Däremot finns det flera studier där både prov från humuslager och mineraljord ingår i funktionerna. Genom att i PTF-funktionen bygga in konstanter för organiskt material och mineraljord (se Stewart, 1970) kan man således genom en teoretisk ansats få fram en funktion som gäller både för organiska jordar och mineraljordar. För svenska skogsjordar ger Stewarts funktionstyp (ex. nr 9 och 12, se tabell 2) ofta fullt användbara volymvikter. Den funktion (nr 9) som Federer (1993) presenterade visade värden som passade mycket bra på det svenska datamaterialet ($R=0.909$). Denna funktion ger dock som högst en volymvikt på 1.45 g/cm^3 , vilket är för lågt för de flesta mineraljordsprov under 1 m djup i svensk skogsmark.

De funktioner som här tagits fram, utgående från halten organiskt kol (OC), ger en god uppskattning av volymvikten i olika markskikt.

Om volymvikt (BD) skall beräknas för prover från enbart humuslager rekommenderas funktion nr 18: $BD=OC/(-2.1278 + 0.1528*OC + 0.2105*OC^2)$

För beräkning av volymvikt i mineraljordshorisonter är skillnaden mellan funktion nr 28: $BD = 1.7262*EXP(-0.3632*OC^{0.5})$ och funktion nr 37: $BD = 1.7587*EXP(-0.3865*OC^{0.5})$ så liten att båda kan användas. Eftersom funktion nr 37 oftast ger lite bättre prediktion av volymvikten för mineraljordsprover med hög halt organiskt kol kan denna funktion dock förordas. Infogas även markdjup i beräkningen av volymvikten förbättras prediktionen något.

Prediktionen av volymvikten skulle förmodligen bli bättre om också texturdata vägdes in. Texturdata finns dock inte i lika hög grad som data på halten organiskt kol.

En stratifiering av datamaterialet med avseende på jordmånstyp och/eller jordmånshorisont skulle förmodligen öka förklaringsgraden i vissa fall. För flertalet av jordmånerna och horisonterna är dock det befintliga datamaterialet för litet.

För att verkligen kunna verifiera att de framtagna funktionerna passar för svenska skogsjordar borde de valideras genom att testa dem mot ett eller flera datamaterial, som ej ingår i det dataset som använts för att ta fram funktionerna. För närvarande har vi tyvärr inte tillgång till ett sådant oberoende dataset från svenska skogsjordar. Det stora datasetet som använts för att ta fram funktionerna anser vi dock borga för att funktionerna är riktiga och användbara.

Därför väljer vi att publicera funktionerna nu. Längre fram är det dock önskvärt att validera funktionerna mot ett oberoende dataset.

Referenser

- Adams, W.A. 1973. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science* 24(1): 10-17.
- Alexander, E.B. 1980. Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 689-692.
- Alexander, E.B. 1989. Bulk density equations for southern Alaska soils. *Can. J. Soil Sci.* 69: 177-180.
- Arrouays, D., Pelissier, P. 1994. Modelling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Science* 157(3): 185-192.
- Bernoux, M., Arrouays, D., Cerri, C., Volkoff, B., Jolivet, C. 1998. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 743-749.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., Owens, L.B., Post, W.M., Izaurralde, R.C. 2005. Strength properties and organic carbon of soils in the North Appalachian region. *Soil Science Society of America Journal* 69: 663-673.
- Calhoun, F.G., Smeck, N.E., Slater, B.L., Bigham, J.M., Hall, G.F. 2001. Predicting bulk density of Ohio soils from morphology, genetic principles, and laboratory characterization data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 811-819.
- Callesen, I., Liski, J., Raulund-Rasmussen, K., Olsson, M.T., Tau-Strand, L., Vesterdal, L., Westman, C.J. 2003. Soil carbon stores in Nordic well-drained forest soils – relationships with climate and texture class. *Global Change Biology* 9: 1-13.
- Curtis, R.O. and Post, B.W. 1964. Estimating bulk density from organic-matter content in some Vermont forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28: 285-286.
- De Vos, B., van Meirvenne, M., Quataert, P., Deckers, J., Muys, B. 2005. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal* 69: 500-510.
- Drew, L.A. 1973. Bulk density estimation based on organic matter content of some Minnesota soils. *Minnesota forestry research notes*, No. 243. 4p.
- Ervö, R. 1970. The importance of soil bulk density in soil testing. *Annales Agriculturae Fenniae* 9: 278-286.
- Eschner, A.R., Jones, B.O., Moyle, R.C. 1957. Physical properties of 134 soils in six northeastern states. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Station Paper No. 89. 11p + tables.
- Federer, C.A. 1983. Nitrogen mineralization and nitrification: depth variation in four New England forest soils. *Soil Science Society of America Journal* 47: 1008-1014.
- Federer, C.A., Turcotte, D.E., Smith, C.T. 1993. The organic fraction – bulk density relationship and the expression of nutrient content in forest soils. *Can. J. For. Res.* 23: 1026-1032.
- Froelich, H.A., Miles, D.W.R., Robbins, R.W. 1986. Growth of young *Pinus contorta* on compacted soil in Washington. *Forest Ecology and Management* 15: 285-294.
- Gosselink, J.G., Hatton, R., Hopkinson, C.S. 1984. Relationship of organic carbon and mineral content to bulk density in Louisiana marsh soils. *Soil Science* 137: 177-180.
- Grigal, D.F., Brovold, S.L., Nord, W.S., Ohmann, L.F. 1989. Bulk density of surface soils and peat in the north central United States. *Can. J. Soil Sci.* 69: 895-900.
- Hamilton, W.N., Krause, H.H. 1985. Relationship between jack pine growth and site variables in New Brunswick plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 15: 922-926.
- Harrison, A.F. and Bockock, K.L. 1981. Estimation of soil bulk density from loss-on-ignition. *Journal of Applied Ecology* 8: 919-927.
- Hartshorn, A.S., Southard, R.J., Bledsoe, C.S. 2003. Structure and function of peatland-forest ecotones in southeastern Alaska. *Soil Science Society of America Journal* 67:1572-1581.
- Heinonen, R. 1977. Towards “normal” soil bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 1214-1215.
- Heuscher, S.A., Brandt, C.C., Jardine, P.M. 2005. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society American Journal* 69: 51-56.
- Hirth, J.R., McKenzie, B.M., Tisdall, J.M. 2005. Ability of seedling roots of *Lolium perenne* L. to penetrate soil from artificial biopores is modified by soil bulk density, biopore angle and biopore relief. *Plant and Soil* 272: 327-336.

- Homann, P.S., Sollins, P., Chappell, H.N., Stangenberger, A.G. 1995. Soil organic-carbon in a mountainous, forested region – relation to site characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59(5): 1468-1475.
- Honeysett, J.L. and Ratkowsky, D.A. 1989. The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. *J. Soil Sci.* 40: 299-308.
- Huntington, T.G., Johnson, C.E., Johnson, A.H., Siccama, T.G., Ryan, D.F. 1989. Carbon, organic matter, and bulk density relationships in a forested spodosol. *Soil Science* 148: 380-386.
- Jeffrey, D.W. 1970. A note on the use of ignition loss as a means for the approximate estimation of soil bulk density. *Journal of Ecology* 58: 297-299.
- Jensen, N.H., Balstrøm, T., Breuning-Madsen, H. 2005. The relations between soil water retention characteristics, particle size distributions, bulk densities and calcium carbonate contents for Danish soils. *Nordic Hydrology* 36: 235-244.
- Jones, C.A. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Science Society of America Journal* 47: 1208-1211.
- Karltun, E. (Ed.). 1995. Acidification of forest soils on glacial till in Sweden. Swedish Environmental Protection Agency, Report 4427. 76p + appendix.
- Kaur, R., Kumar, S., Gurung, H.P. 2002. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Aust. J. Soil Res.* 40: 847-857.
- Krizek, D.T., Ritchie, J.C., Sadeghi, A.M., Foy, C.D., Rhoden, E.G., Davis, J.R., Camp, M.J. 2003. A four-year study of biomass production of eastern gamagrass grown on an acid compact soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34: 457-480.
- Larsson, R. 1989. Jords egenskaper. Statens geotekniska institut, SGI Information nr 10. 48 sid.
- Leonavičiūtė, N. 2000. Predicting soil bulk and particle densities by pedotransfer functions from existing soil data in Lithuania. *Geografijos metraštis* 33:317-330.
- Mbagwu, J., Lal, R., Scott, T.W. 1983. Physical properties of three soils in southern Nigeria. *Soil Science* 136: 48-55.
- Manrique, L.A. and Jones, C.A. 1991. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 476-481.
- Nichols, D.S., Boelter, D.H. 1984. Fiber size distribution, bulk density, and ash content of peats in Minnesota, Wisconsin, and Michigan. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1320-1328.
- Perruchoud, D., Walthert, L., Zimmermann, S., Lüscher, P. 2000. Contemporary carbon stocks of mineral forest soils in the Swiss Alps. *Biogeochemistry* 50: 111-136.
- Prévost, M. 2004. Predicting soil properties from organic matter content following mechanical site preparation of forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 943-949.
- Raulund-Rasmussen, K., Callesen, I. 1999. Nordsoil – Nordic forest soil data base. CD-disc. A project supported by the Nordic Forest Research Co-operation Committee (SNS).
- Rawls, W.J. 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Sci.* 135: 123-125.
- Rodriguez-Murillo, J.C. 2001. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. *Biol. Fertil. Soils* 33: 53-61.
- Saini, G.R. 1966. Organic matter as a measure of bulk density of soil. *Nature* 210: 1295-1296.
- Salifu, K.F., Meyer, W.L., Murchison, H.G. 1999. Estimating soil bulk density from organic matter content, pH, silt and clay. *Journal of Tropical Forestry* 15: 112-120.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.T. 1998. Development of pedotransfer functions and related computer programs. In: *Proceedings of the 16th World Soil Science Congress, ISSS, AFES, Montpellier.*
- Schleier, C. 2000. The development of organic and mineral 'post fen soils' as the result of intensive cultivation of fens in northeastern Germany. Québec 2000: 11th International Peat Congress, Vol. I: 450-459.
- Schwärzel, K., Renger, M., Sauerbrey, R., Wessolek, G. 2002. Soil physical characteristics of peat soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165: 479-486.
- Sjörs, H. 1961. Some chemical properties of the humus layer in Swedish natural soils. *Kungl. Skogshögskolans Skrifter nr 37.* 51 pp.
- Soto, B., Arias, M., Diaz-Fieiros, Y.F. 2001. Desarrollo de una función de pedotransferencia para los suelos de Galicia (NW Spain). *Agrochimica* 45: 178-188.

- Stewart, V.I., Adams, W.A., Abdulla, H.H. 1970. Quantitative pedological studies on soils derived from Silurian mudstones. II. The relationship between stone content and the apparent density of the fine earth. *Journal of Soil Science* 21(2): 248-247.
- Strong, W.L., La Roi, G.H. 1985. Root density – soil relationships in selected boreal forest of central Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management* 12: 233-251.
- Tamminen, P. and Starr, M. 1994. Bulk density of forested mineral soils. *Silva Fennica* 28: 53-60.
- Tomasella, J., Hodnett, M.G. 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian. *Soil Science* 163: 190-202.
- Torri, D., Poesen, J., Monaci, F., Busoni, E. 1994. Rock fragment content and fine soil bulk density. *Catena* 23: 65-71.
- Tremblay, S., Ouimet, R., Houle, D. 2002. Prediction of organic carbon content in upland forest soils of Québec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 903-914.
- Troedsson, T., Nykvist, N. 1973. *Marklära och markvård*. Almqvist & Wiksell Läromedel AB, Stockholm. 403 sid.
- Van Lierop, W. 1981. Laboratory determination of field bulk density for improving fertilizer recommendations of organic soils. *Can. J. Soil Sci.* 61: 475-482.
- Van Wesemael, B., Mulligan, M., Poesen, J. 2000. Spatial patterns of soil water balance on intensively cultivated hillslopes in a semi-arid environment: the impact of rock fragments and soil thickness. *Hydrological Processes* 14: 1811-1828.
- Vincent, K.R., Chadwick, O.A. 1994. Synthesizing bulk-density for soils with abundant rock fragments. *Soil Science Society of America Journal* 58(2): 455-464.
- Wall, A., Heiskanen, J. 2003. Water-retention characteristics and related physical properties of soil on afforested agricultural land in Finland. *Forest Ecology and Management* 186: 21-32.

Bilaga A.

Tidigare publicerade funktioner för beräkning av volymvikten

I nedanstående text redovisas, kronologiskt och kortfattat, ett antal av de artiklar och rapporter där man redovisat funktioner för beräkning av volymvikten (BD).

Eschner m.fl. (1957):

134 jordprov togs från mineraljorden (0-15, 15-30 cm djup) i skogsmark eller uppodlad mark i sex stater i nordöstra USA. Volymvikten (BD, i g/cm³), halten organiskt material (OM, i vikt-%), lerinnehåll (clay, i vikt-%) och sandinnehåll (sand, i vikt-%) analyserades. För skiktet 0-15 cm presenterades följande samband:

$$\begin{aligned} \text{BD} &= 1.3546 - 0.0346 \cdot \text{OM} \\ \text{BD} &= 1.816 - 0.7891 \cdot \log(\text{OM}+2) & R^2 &= 0.453 \\ \text{BD} &= 1.8014 - 0.8491 \cdot \log(\text{OM}+2) + 0.0026 \cdot \text{clay} & R^2 &= 0.483 \end{aligned}$$

För skiktet 15-30 cm presenterades följande samband:

$$\begin{aligned} \text{BD} &= 1.5246 - 0.0491 \cdot \text{OM} & R^2 &= 0.433 \\ \text{BD} &= 1.2498 - 0.0487 \cdot (\text{OM}) + 0.0063 \cdot \text{clay} + 0.0034 \cdot \text{sand} & R^2 &= 0.487 \end{aligned}$$

Curtis & Post (1964):

103 prov från O, A, E och B-horisonter från sura moränjordar i skogsmark på Green Mountains i Vermont, nordöstra USA analyserades på volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt material (OM, i vikt-%). Följande samband erhöles mellan BD och OM:

$$\log(\text{BD} \cdot 100) = 2.09963 - 0.00064 \cdot (\log \text{OM}) - 0.22302 \cdot (\log \text{OM})^2 \quad n = 103 \quad R^2 = 0.96$$

Några få prov från C-horisonen passade inte riktigt in i denna modell, då proven från C-horisonen hade betydligt högre värden på BD.

Saini (1966):

110 jordprov från Ohio, USA analyserades på volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt material (OM, i vikt-%). Jordarna klassificerades in i tre olika grupper: well-drained, imperfectly drained och humic-gley soils. Sambandet mellan BD och OM beräknades för dessa tre marktyper:

$$\begin{aligned} \text{Humic-gley soils:} \\ \text{BD} &= 1.62 - 0.06 \cdot \text{OM} & n &= 30 & R^2 &= 0.74 \\ \text{Imperfectly drained soils:} \\ \text{BD} &= 1.53 - 0.06 \cdot \text{OM} & n &= 40 & R^2 &= 0.65 \\ \text{Well drained soils:} \\ \text{BD} &= 1.52 - 0.06 \cdot \text{OM} & n &= 40 & R^2 &= 0.40 \end{aligned}$$

Jeffrey (1970):

Jeffrey använde data på volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt material (OM, i vikt-%) från olika undersökningar (34 prov) + 46 egna mätningar på jordprov (0-5 cm) från norra England. OM i de totalt 80 proven varierade från nästan 0 till nästan 100 %, medan BD varierade från ca 0.1 till 1.8 g/cm³. Följande samband presenteras mellan BD och OM:

$$BD = 1.482 - 0.6786 \cdot (\log OM) \quad n = 80 \quad R^2 = 0.818$$

Erviö (1970):

Från 33 lokaler på jordbruksmark i södra Finland togs sammanlagt 98 jordprov från tre olika djup: 5-15 cm, 25-35 cm och 45-55 cm. Volymvikten (BD) varierade från 0.14 – 1.52 g/cm³. Sambandet mellan BD och halten organiskt material (OM, i vikt-%) var:

$$BD^{0.5} = 1.306 - 0.106 \cdot OM^{0.5} \quad n = 98 \quad R^2 = 0.933$$

Stewart m.fl. (1970):

Stewart tog fram en teoretisk funktion för sambandet mellan volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt material (OM, i g/g):

$$BD = 100 / ((OM / K_1) + (100 - OM / K_2))$$

Denna funktion applicerade han på 38 jordprov från Cwmcadian, Merionethshire, Wales och fick fram följande konstanter:

$K_1 = BD$ för organiskt material (0.25 g/cm³), $K_2 =$ bulk densitet för mineraljord (1.40 g/cm³)
OM i g/g, BD bestämd vid pF=3.

Adams (1973):

77 prov togs från O- och E-horisonter i en skog i norra delen av Wales. Halten organiskt material (OM) varierade från 4-99 vikt-%. Volymvikten (BD, i g/cm³) bestämdes dels i fält och vid pF 2.2. För 45 av proven bestämdes även BD vid pF 3.0 och 3.3. Följande funktion användes:

$$BD = 100 / ((OM / K_1) + (100 - OM / K_2))$$

För fältfuktiga prov erhöles:

$K_1 = BD$ för organiskt material (0.223 g/cm³), $K_2 =$ bulk densitet för mineraljord (1.27 g/cm³) om OM varierade mellan 0-75 %.

Vid pF=3.0 och OM mellan 0-100 vikt-% erhöles:

$K_1 = BD$ för organiskt material (0.257 g/cm³), $K_2 =$ bulk densitet för mineraljord (1.43 g/cm³)

Vid pF=3.3 och OM mellan 0-100 vikt-% erhöles:

$K_1 = BD$ för organiskt material (0.291 g/cm³), $K_2 =$ bulk densitet för mineraljord (1.54 g/cm³)

Drew (1973):

136 jordprov (förmodligen mineraljord) från skogsmark i Minnesota analyserades på volymvikt (BD) och halten organiskt material (OM). Volymvikten varierade mellan 0.77-1.70 g/cm³ och halten organiskt material mellan 0.17-13.5 vikt-%. Den funktion som gav det bästa sambandet med uppmätta värden var:

$$BD = 1 / (0.6268 + 0.0361 \cdot OM) \quad n = 136 \quad R^2 = 0.709$$

Andra funktioner på samma material som presenteras i rapporten var:

$BD = 1.5697 - 0.0552 \cdot OM$	$n = 136$	$R^2 = 0.683$
$BD = 1.2776 + 0.1361 \cdot OM$	$n = 136$	$R^2 = 0.346$
$BD = 1.4964 - 0.1730 \cdot \log(OM)$	$n = 136$	$R^2 = 0.676$
$BD = 1.4918 - 0.0043 \cdot OM^2$	$n = 136$	$R^2 = 0.561$
$BD = 1.5697 - 0.0552 \cdot OM$	$n = 136$	$R^2 = 0.683$
$1/BD = 0.8073 - 0.0788 \cdot OM$	$n = 136$	$R^2 = 0.285$
$1/BD = 0.6776 + 0.1061 \cdot \log(OM)$	$n = 136$	$R^2 = 0.626$
$1/BD = 0.6751 + 0.0029 \cdot OM^2$	$n = 136$	$R^2 = 0.634$
$\log(BD) = 0.4568 - 0.0442 \cdot OM$	$n = 136$	$R^2 = 0.704$
$\log(BD) = 0.3966 - 0.1338 \cdot \log(OM)$	$n = 136$	$R^2 = 0.659$
$\log(BD) = 0.3962 - 0.0035 \cdot OM^2$	$n = 136$	$R^2 = 0.602$
$BD^2 = 2.4479 - 0.1431 \cdot OM$	$n = 136$	$R^2 = 0.651$
$BD^2 = 2.2648 - 0.4573 \cdot \log(OM)$	$n = 136$	$R^2 = 0.679$

Alexander (1980):

Totalt 721 jordprov från uppodlade och ej odlade områden i Kalifornien, USA uppdelades i två dataset: upland soils ($n=386$), alluvial soils ($n=335$). Volymvikten (BD, i g/cm^3) i båda dataseten var signifikant korrelerat med halten organiskt kol (OC i vikt-%), $r = -0.577$ - -0.619), vattenhalten vid 15 bar (W15; $r = -0.229$ - -0.505), kvoten av vattenhalten vid 15 bar och lerinnehållet (W15/clay; $r = -0.541$ - -0.568), samt provdjup ($r = 0.238$ - 0.270). För datasetet med upland soils var BD även signifikant korrelerat med innehållet av sand ($r = 0.173$), silt ($r = -0.124$) och lera ($r = -0.155$).

Följande samband presenterades för upland soils:

$BD = 1.66 - 0.308 \cdot OC^{0.5}$	$n = 386$	$R^2 = 0.462$
$BD = 1.57 - 0.287 \cdot OC^{0.5} + 5.004 \cdot W15 - 41.866 \cdot w15^2 + 74.689 \cdot W15^3$	$n = 386$	$R^2 = 0.656$
$BD = 2.92 - 0.230 \cdot OC^{0.5} + 4.274 \cdot W15 - 36.901 \cdot w15^2 + 66.628 \cdot W15^3 - 1.44 \cdot (W15/clay)^{0.1}$	$n = 386$	$R^2 = 0.701$

Följande samband presenterades för alluvial soils:

$BD = 1.72 - 0.294 \cdot OC^{0.5}$	$n = 335$	$R^2 = 0.332$
$BD = 4.99 - 0.257 \cdot OC^{0.5} - 3.537 \cdot (W15/clay)^{0.1}$	$n = 335$	$R^2 = 0.569$
$BD = 4.92 - 0.250 \cdot OC^{0.5} - 3.723 \cdot (W15/clay)^{0.1} - 0.360 \cdot \text{silt} + 1.381 \cdot \text{sand}^2 - 1.462 \cdot \text{sand}^3$	$n = 335$	$R^2 = 0.632$

Harrison & Bocoek (1981):

Anpassade log-funktioner till data (volymvikt; BD och halten organiskt material; OM) från åtta olika undersökningar världen över. Metoderna för volymviktsbestämning var delvis olika.

Område / Publikation	Marktyp	Provdjup (cm)	n	Variation BD (g/cm^3)	Variation OM (vikt-%)
1. Farne Islands NE England	Gleysoler, podsoler brunjordar	0-2	83	0.23 - 1.25	9.6 - 86.9
		2-20	62	0.20 - 0.96	6.0 - 87.4
2. Cumbria NW England	brunjordar, podsolerade brunjordar	0-5	100	0.11 - 0.97	10 - 93.2
		10-15	90	0.23 - 0.99	5.1 - 80.4
3. S Sverige /Andersson (1970) ängar och skogsmark	sura till neutrala brunjordar	0-10	20	0.21 - 0.85	12.2 - 44.3
		10-90	177	0.39 - 1.84	3.7 - 27.9

4. Jeffrey (1970)	torvjordar och mineraljordar	0-30	80	0.07 – 1.80	1.0 – 96.0
5. Sverige / Sjörs (1961) Torv-, skog- och hedmarker	torvjordar och mineraljordar	0-6	81	0.03 – 1.14	6.9 – 98.7
6. Dorset, S. England	torra sandjordar på hed	0-20	50	0.43 – 1.14	3.1 – 17.6
7. Tallplanteringar i England	torvjordar och mineraljordar	0-5 5-25	74 74	0.06 – 1.22 0.22 – 1.62	2.4 – 97.0 0.8 – 50.0
8. Nya Zeeland gräsmarker	torvjordar och mineraljordar	0-9 1.5–63	51 135	0.20 – 1.46 0.03 – 1.87	4.0 – 95.0 0.1 – 96.0

Följande samband erhöles för de olika undersökningarna ovan:

1: $BD = 1.914 - 0.895 \cdot (\log OM)$	n = 145	$R^2 = 0.77$
2: $BD = 1.429 - 0.677 \cdot (\log OM)$	n = 190	$R^2 = 0.74$
3: $BD = 2.089 - 1.156 \cdot (\log OM)$	n = 197	$R^2 = 0.96$
4: $BD = 1.562 - 0.727 \cdot (\log OM)$	n = 80	$R^2 = 0.90$
5: $BD = 1.531 - 0.735 \cdot (\log OM)$	n = 81	$R^2 = 0.88$
6: $BD = 1.392 - 0.556 \cdot (\log OM)$	n = 50	$R^2 = 0.40$
7: $BD = 1.362 - 0.669 \cdot (\log OM)$	n = 148	$R^2 = 0.83$
8: $BD = 1.800 - 0.772 \cdot (\log OM)$	n = 186	$R^2 = 0.69$
Ytliga prov från 1-8: $BD = 1.558 - 0.728 \cdot (\log OM)$	n = 537	$R^2 = 0.81$
Ej ytliga prov från 1-8: $BD = 1.729 - 0.769 \cdot (\log OM)$	n = 536	$R^2 = 0.58$

Van Lierop (1981):

30 organiska jordar från Quebec, Canada med en volymvikt mellan 0.100 – 0.54 g/cm³ testades. Sambandet mellan volymvikt (BD) och pH-CaCl₂, vattenkvot i % (WPC) och askhalt i % ts (ash) beräknades:

$BD = 0.016 + 0.0495 \cdot \text{pH-CaCl}_2$	n = 30	$R^2 = 0.51$
$BD = 14.707 \cdot \text{WPC}^{-0.731}$	n = 30	$R^2 = 0.91$
$BD = 0.152 + 0.0054 \cdot \text{ash}$	n = 30	$R^2 = 0.72$

Federer (1983):

Federer (1983) redovisar mycket kort i en artikel om kväve mineralisering ett samband mellan volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt material (OM, i g/g) för prover från humuslager och mineraljord i norra New Hampshire, USA. OM varierade mellan 0.01 till 0.93 g/g. Funktionen var:

$$\ln BD = -2.314 - 1.0788 \cdot \ln OM - 0.1132 \cdot (\ln OM)^2$$

Mbagwu m.fl. (1983):

Totalt 21 jordprov togs från två Alfisol och en Ultisol i södra Nigeria. Provdjupen i de tre profilerna var 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm, 50-70 cm och 70-100 cm. Volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt kol (OC, %) bestämdes bl.a. i proven från dessa djup. Följande samband mellan BD och OC presenterades:

$$BD = 1.5056 - 0.1588 \cdot OC \quad R^2 = 0.18$$

Makroporositeten (S_a, %) i proven hade bättre samband med volymvikten än OC:

$$BD = 1.5193 - 0.0077 * S_a, \quad R^2 = 0.74$$

Rawls (1983):

Prov från 2721 olika horisonter från en rad olika jordar analyserades på halten organiskt material (OM), volymvikt (BD) och textur (vikt-% sand, silt och ler). OM varierade från 0.1 – 12.5 vikt-% och BD från 0.7 – 2.09 g/cm³. Sandiga jordar hade vanligtvis högre BD än leriga jordar. Samma funktionstyp, som den Stewart m.fl. (1970) tog fram, användes för att beräkna BD från OM:

$$BD = 100 / ((OM / K_1) + (100 - OM / K_2))$$

$K_1 = BD$ för organiskt material (0.224 g/cm³), $K_2 =$ mineral bulk densitet varierade från 1.0 upp till 1.7 g/cm³ beroende på vilken typ av textur jorden hade.

Gosselink m.fl. (1984):

Volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt kol (OC, i % t.s) analyserades i 288 jordprov från våtmarksområden i Louisiana, USA. Följande samband mellan BD och OC gavs:

$$BD = 100 * (0.026 / OC) \quad R^2 = 0.93$$

Alexander (1989):

55 jordprov från olika nivåer i mineraljorden från 17 profiler (främst podsoler) i sydöstra Alaska analyserades på bland annat volymvikt (BD) och halten organiskt kol (OC). Följande samband mellan BD (g/cm³) och OC (g/kg) erhöles:

$BD = 1.827 * e^{-0.121OC^{*0.5}}$	n = 55	$R^2 = 0.809$
$1/BD = 0.745 + 0.0105 * OC$	n = 55	$R^2 = 0.772$
$BD = 1.27 * e^{-0.0074 * OC}$	n = 55	$R^2 = 0.723$
$BD = 2.95 * OC^{-0.362}$	n = 55	$R^2 = 0.779$
$BD = 2.00 - 0.3094 * \ln(OC)$	n = 55	$R^2 = 0.758$
$BD = 1.586 - 0.100 * OC^{0.5}$	n = 55	$R^2 = 0.734$

Grigal m.fl. (1989):

På 171 skogsmarkslokaler i Minnesota, Wisconsin och Michigan togs 812 prover från humuslagret och 800 prover från de översta 25 cm av mineraljorden. Dessutom provtogs 10 torvmarker i norra och östra Minnesota på olika djup (0-25 cm osv. ner till 175 cm djup). Sammanlagt togs 232 torvprov. Proven analyserades på volymvikt (BD) och halten organiskt material (OM). Följande samband erhöles för olika marklager:

Humuslagret (BD varierade från 0.02 – 1.5 g/cm³, OM mellan 10-95 % av t.s.):

$$BD = 0.073 + 2.369 * e^{-0.073 * OM} \quad n = 812 \quad R^2 = 0.75$$

Ytliga mineraljorden (BD varierade från 0.35 – 1.9 g/cm³, OM mellan 0.5 – 17 % av t.s.):

$$BD = 0.669 + 0.941 * e^{-0.240 * OM} \quad n = 800 \quad R^2 = 0.95$$

Prov från humuslager och mineraljord:

$$BD = 0.075 + 1.301 * e^{-0.060 * OM} \quad n = 1612 \quad R^2 = 0.93$$

Torvprov (BD varierade från 0.02 till 0.19 g/cm³, OM från 75-98 % av t.s.):
BD=0.043*X + 4.258*e^{-0.047*OM} n = 232 R² = 0.89

Där X = 0 för ytliga torvprov (0-25 cm) och X = 1 för torvprov tagna mellan 25 och 175 cm under markytan.

Honeysett & Ratkowsky (1989):

Från 12 skogsytter i södra Tasmanien, Australien insamlades 136 jordprov, främst från 0-10 cm djup. Volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt material (OM, i vikt-%) bestämdes bl.a. på dessa prov. Halten organiskt kol (OC, i %) bestämdes på 96 av proven. Halten organiskt material (OM) varierade mellan 1.83-87.9 % och hade bättre samband med BD än vad OC hade, r=-0.927 resp. r=-0.888. Volymvikten varierade mellan 0.20-1.55 g/cm³. Honeysett & Ratkowsky presenterade följande samband, där V_b=1/BD:

$$V_b = 0.564 + 0.0556 * OM \quad R^2 = 0.975$$
$$BD = 1.801 - 0.397 * \ln(OM) \quad R^2 = 0.95$$

Genom att sätta in OM=100 eller OM=0 i den första ekvationen kan man få fram värden på BD för det organiska materialet (BD_o), respektive mineraljorden (BD_m), se Adams (1973): BD_o = 0.163 g/cm³, BD_m = 1.77.

Huntington m.fl. (1989):

Inom ett 22 ha stort avrinningsområde vid Hubbard Brook Experimental Forest i New Hampshire uppgrävdes 60 0.5 m² stora gropar ner till C-horisontens början. Humuslagret provtogs på två nivåer (O_i+O_e och O_a). Mineraljorden uppgrävdes och provtogs i tre skikt: 0-10 cm, 10-20 cm och 20 cm ner till övre delen av C-horisonten. Två funktioner för beräkning av volymvikten (BD, i g/cm³) redovisas där halten organiskt material (OM, i g/g) eller halten organiskt kol (OC, i %) är oberoende variabel:

$$\ln BD = -2.39 - 1.316 * \ln OM - 0.167 * (\ln OM)^2 \quad R^2 = 0.75$$
$$\ln BD = -0.263 - 0.147 * \ln OC - 0.103 * (\ln OC)^2 \quad R^2 = 0.72$$

Manrique & Jones (1991):

Från en databas innehållande data på volymvikt (BD, i g/cm³), halten organiskt kol (OC, i %), textur (clay, silt, clay+silt [CS], sand; i vikt-%), vattenhalt vid 1500 kPa (WC15, vikt-%) och WC15/clay (WC15C) från 19 651 jordprover från USA, Hawaii, Puerto Rico och några andra länder beräknades samband mellan BD och övriga variabler. Histosoler ingick inte i det dataset på vilket beräkningar gjordes. Beräkningarna gjordes dels på hela materialet och uppdelat på olika jordmåner och horisonter. Följande funktioner erhöles för hela datamaterialet:

$$BD = 1.510 - 0.113 * OC \quad n = 19\ 651 \quad R^2 = 0.36$$
$$BD = 1.660 - 0.318 * OC^{0.5} \quad n = 19\ 651 \quad R^2 = 0.41$$
$$BD = 1.740 - 0.218 * OC^{0.5} + 0.005 * clay - 0.023 * WC15 \quad n = 19\ 226 \quad R^2 = 0.58$$

Federer m.fl. (1993):

480 jordprov (prov från både humuslager och mineraljord) från 9 olika lokaler i skogsmark i New England, USA analyserades på volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt material

(OM, i g/g). En funktionstyp, liknande den som Stewart m.fl. (1970) tog fram, användes för att beräkna BD från OM:

$$BD = (K_1 * K_2) / ((K_2 * OM) + (1 - OM) * K_1)$$

K1 = BD för organiskt material (0.111 g/cm³), K2 = bulk densitet för mineraljord (1.450 g/cm³)

Arrouays & Pelissier (1994):

Totalt 70 jordprov togs från mineraljorden i sju skogsjordar i sydvästra Frankrike. Proven analyserades bland annat på volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt kol (OC, i %). Sambandet mellan BD och OC angavs med följande funktion:

$$\ln BD = 0.317 - 0.092 * \ln OC \quad n = 70 \quad R^2 = 0.55$$

Tamminen & Starr (1994):

På 75 lokaler på skogsmark i centrala och norra delarna av Finland togs prover från mineraljorden på 0-5 cm djup (n = 75), 30-35 cm djup (n = 60), 60-65 cm djup (n = 23). Volymvikt (BD) och halten organiskt material (OM) varierade från 0.48 – 1.97 g/cm³, resp. 0.2 – 20.5 vikt-%. BD för material < 2 mm (BD2) var korrelerat med följande variabler: OM: -0.63***, torrsubstans: 0.57***, grusinhåll (vikt-%): -0.55***, sorteringskoefficient (-0.42***), finjordsinhåll (vikt-%): -0.10, log(medianpartikelstorlek): -0.07, lerinhåll: -0.04. I en separat tabell redovisades korrelationskoefficienten mellan BD2 och olika transformeringar av OM: OM = -0.76, OM² = -0.63, OM^{0.5} = -0.78, ln(OM) = -0.77. BD2 tenderade att minska med ökad partikelstorlek (grövre textur).

Sambandet mellan BD2 och OM var mer linjärt än vad vissa andra undersökningar visat, förmodligen på grund av att proven var tagna i mineraljord:

$$BD2 = 1.565 - 0.2298 * OM^{0.5} \quad n = 158 \quad R^2 = 0.61$$

En ökad BD med provdjup (i m) observerades (notera dock att provdjupet endast kunde ha tre värden):

$$BD2 = 1.422 + 0.1048 * \ln(\text{provdjup}) \quad n = 158 \quad R^2 = 0.40$$

Följande multipelregressionsmodeller redovisades för hela materialet (n = 158):

$$BD = 1.667 - 0.2221 * OM^{0.5} - 0.00107 * \text{grusinhåll} + 0.04827 * \ln(\text{provdjup}) + 0.06046 * \ln(\text{lerinhåll} + 1) \quad R^2 = 0.83$$

$$BD = 1.625 - 0.2870 * OM^{0.5} - 0.00905 * \text{grusinhåll} + 0.08265 * \ln(\text{lerinhåll} + 1) \quad R^2 = 0.78$$

Homann m.fl. (1995):

Data från ett flertal studier i västra Oregon, USA användes för att beräkna mängden kol i marken. För de prov där volymvikt (BD, i g/cm³) saknades i A, Ap och B-horisonterna användes följande funktioner för att beräkna BD från halten organiskt kol (OC, i g/kg):

Horisont, marktyp	Funktion	n	R ²
A, pumice-ash or andic	BD = 0.92 - 0.0028 * OC	103	0.48
B, pumice-ash or andic	BD = 1.09 - 0.0074 * OC	68	0.39
A, other	BD = 1.39 - 0.0092 * OC	59	0.62
Ap, other	BD = 1.53 - 0.0086 * OC	19	0.66
B, other	BD = 1.42 - 0.0122 * OC	153	0.22

Tomasella & Hodnett (1998):

Data på volymvikt (BD, i g/cm³), halten organiskt kol (OC, i %), innehållet av silt och lera (clay) i vikt-% från 396 jordprov från olika delar av brasilianska Amazonas användes för att ta fram följande funktion:

$$BD = 1.578 - 0.054*OC - 0.006*silt - 0.004*clay \quad R^2 = 0.599$$

Bernoux m.fl. (1998):

Sambandet mellan volymvikt (BD, i g/cm³), textur, halten organiskt kol (OC, i %) samt annan markkemi beräknades utgående från en databas på 323 jordmånshorisonter från främst Alfisol, Ultisol och Oxisol i brasilianska Amazonas. BD varierade mellan 0.74 – 1.58 g/cm³, OC mellan 0.04 – 12.16 %, provdjup mellan 1.5 och 160 cm, lerinnehållet mellan 3.9 och 90.7 vikt-%. Lerinnehållet hade den bästa förklaringsgraden (37 % av variationen) för BD. Läger man till OC i regressionen förklaras nästan 50 % av variationen i BD. Sandinnehåll och pH-H₂O var också signifikanta (p < 0.01) oberoende variabler. Följande funktioner redovisas för hela datamaterialet (n = 323):

BD = 1.352 - 0.0045*clay	R ² = 0.369
BD = 1.398 - 0.0047*clay - 0.042*OC	R ² = 0.498
BD = 1.606 - 0.0046*clay - 0.051*OC - 0.047*pH-H ₂ O	R ² = 0.542
BD = 1.524 - 0.0038*clay - 0.050*OC - 0.045*pH-H ₂ O + 0.0010*sand	R ² = 0.558

Salifu m.fl. (1999):

Från 28 skogsytter i Bosomoa, Ghana togs jordprover i ytskiktet 0-20 cm. Bulk densitet (BD, i g/cm³), pH, textur (vikt-%) och halten organiskt material (OM, i vikt-%) bestämdes. Följande samband gavs:

$$BD = 2.40 - 0.32*\ln(OM) - 0.03*clay - 0.14*pH \quad R^2 = 0.62$$

Leonavičiūtė (2000):

Från 72 fastmarksprofiler i Litauen togs prover från markytan ned till 120-200 cm djup i 10 cm-intervall. På de totalt 993 proven analyserades bl.a. textur (vikt-%), halten organiskt material (OM, i %) och volymvikt (BD, i g/cm³). Halten organiskt kol (OC, i %) beräknades genom att dividera OM med 1.72. Datamaterialet delades upp med avseende på jordmånshorisonter och följande samband gavs:

A-horisont:	BD = 1.704 - 0.00313*silt + 0.00261*clay - 0.1125*OC
	n = 140 R ² = 0.83
E-horisont:	BD = 0.999 - 0.00592*ln(silt) + 0.07712*ln(clay) + 0.09370*ln(sand) - 0.08415*ln(OC)
	n = 56 R ² = 0.47
B-horisont:	BD = 1.073 + 0.03273*ln(silt) + 0.03875*ln(clay) + 0.07889*ln(sand) - 0.05431*ln(OC)
	n = 296 R ² = 0.50
BC-C-horisont:	BD = 1.067 + 0.01074*ln(silt) + 0.08068*ln(clay) + 0.08759*ln(sand) - 0.05647*ln(OC)
	N = 455 R ² = 0.46

Perruchoud m.fl. (2000):

Från 138 skogsmarkslokaler spridda över hela Schweiz fanns data på volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt kol (OC, i %) i de övre 10 cm av mineraljorden. Nedanstående funktioner presenteras i artikeln. (Residual sum of squares [RSS] redovisas som mått på förklaringsgrad. Den funktion som har lägst RSS anses ha den bästa förklaringsgraden):

$$\begin{array}{ll} \text{BD} = 1.11 - 0.15 \cdot \text{OC}^{0.5} & \text{RSS} = 3.07 \\ \text{BD} = 1.03 - 0.40 \cdot \log(\text{OC}) & \text{RSS} = 3.19 \\ \ln(\text{BD}) = 0.04 - 0.11 \cdot \ln(\text{OC}) - 0.05 \cdot (\ln \text{OC})^2 & \text{RSS} = 2.97 \\ \text{BD} = 0.44 + 0.65 \cdot e^{-0.14 \cdot \text{OC}} & \text{RSS} = 2.95 \end{array}$$

Rodriguez-Murillo (2001):

Publicerat material med data på volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt kol (OC, i %) för jordprov från 192 olika horisonter i markprofiler fördelade över hela Spanien användes för att ta fram olika samband mellan BD och OC samt provdjup (depth). Följande samband presenterades:

$$\begin{array}{ll} \text{BD}^{0.5} = 1.17 - 0.018 \cdot \text{OC} & R^2 = 0.44 \\ \text{BD} = 1.29 - 0.50 \cdot \log(\text{OC}) & R^2 = 0.59 \\ \text{BD} = 1 / (0.622 + 0.098 \cdot \text{OC}) & R^2 = 0.67 \\ \text{BD} = 1 / ((0.575 + 0.104 \cdot \text{OC}) \cdot (1 + 0.0012 \cdot \text{depth})) & R^2 = 0.69 \end{array}$$

Förklaringsgraden (R^2) ökade inte signifikant om även provdjup infördes i funktionen. Infördes texturdata (vikt-% sand eller vikt-% lera) istället för provdjup ökade förklaringsgraden inte heller signifikant.

Soto m.fl. (2001):

265 jordprov från 77 markprofiler i Galicien (nordvästra Spanien) analyserades på bland annat volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt kol (OC, i %). Följande samband erhöles:

$$\text{BD} = 1.2237 - 0.2027 \cdot \ln \text{OC} \quad n = 265 \quad R^2 = 0.662$$

Tremblay m.fl. (2002):

Data från 284 väl undersökta skogsmarksprofiler på fastmark i Quebec, Canada användes för att beräkna kolförrådet i totalt 5547 skogsmarksprofiler i denna stat. En funktionstyp, liknande den som Stewart m.fl. (1970) tog fram, användes för att ta fram ett samband mellan volymvikten (BD, i g/cm³) från halten organiskt material (OM, i %) i mineraljorden:

$$\text{BD} = (K_1 \cdot K_2) / ((K_2 \cdot \text{OM}) + (1 - \text{OM}) \cdot K_1)$$

K_1 = BD för organiskt material (0.120 g/cm³), K_2 = bulk densitet för mineraljord (1.400 g/cm³)
 $n = 281 \quad R^2 = 0.56$

Kaur m.fl. (2002):

224 jordprov från 58 lokaler i Almora distriktet i Uttaranchal State i norra Indien analyserades på bl.a. textur, halten organiskt kol (OC, i %) och volymvikt (BD, i g/cm³). Innehållet av sand, silt och ler angavs i vikt-%. Hälften av dessa prov användes för att ta fram några

funktioner för beräkning av BD. OC i dessa 112 prov varierade från 0.07 – 2.32 %. BD varierade från 0.08 till 1.79 g/cm³. Följande funktioner redovisades:

$$\begin{aligned} \text{BD} &= 1.506 - 0.266 \cdot \text{OC} + 0.004517 \cdot \text{clay} - 0.00352 \cdot \text{silt} & R^2 &= 0.50 \\ \text{BD} &= 1.488 - 0.668 \cdot \text{OC} + 0.0002053 \cdot \text{OC}^2 - 0.000309 \cdot \text{clay} \cdot \text{sand} + 0.009816 \cdot \text{clay}^2 + 0.144 \cdot \text{OC} \cdot \text{clay} & R^2 &= 0.62 \\ \text{BD} &= 1.386 - 0.404 \cdot \text{OC} + 0.00023505 \cdot \text{OC}^3 - 0.00000587 \cdot \text{clay} \cdot \text{sand} + 0.04956 \cdot \text{clay}^3 & R^2 &= 0.62 \\ \text{BD} &= \exp(0.313 - 0.191 \cdot \text{OC} + 0.02102 \cdot \text{clay} - 0.000476 \cdot \text{clay}^2 - 0.00432 \cdot \text{silt}) & R^2 &= 0.62 \end{aligned}$$

Callesen m.fl. (2003):

I en databas (NORDSOIL) innehållande data från ca 300 skogsytor i Sverige, Finland, Norge och Danmark fanns 958 prov från olika horisonter med data på bland annat volymvikt (BD, i g/cm³) och halten organiskt kol (OC, i mg/g). OC hade den bästa korrelationen ($r = -0.82$) med BD. Genom stratifiering på jordmånstyp och jordmåns horisont togs funktioner fram mellan BD och OC, där OC transformerades genom kvadratrottutdrag:

Entisoler, Spodosoler, Inceptisoler:

$$\begin{aligned} \text{A-, B- och E-horisonter:} & \quad \text{BD} = 1.590 - 0.1045 \cdot \text{OC}^{0.5} & R^2 &= 0.66 \\ \text{C-horisonter:} & \quad \text{BD} = 1.685 - 0.1045 \cdot \text{OC}^{0.5} & R^2 &= 0.66 \end{aligned}$$

Alfisoler och Mollisoler:

$$\text{A-, E-, B- och C-horisonter:} \quad \text{BD} = 1.83 - 0.131 \cdot \text{OC}^{0.5} \quad R^2 = 0.58$$

Hartshorn et al. (2003):

Utgående från prov tagna i organiska horisonter (inklusive torv) i transsektorer mellan en torvmark och intilliggande skog på mineraljord i sydöstra Alaska, erhöles följande samband mellan volymvikt (BD, i g/cm³) och den provtagna horisontens medeldjup under markytan (z , i cm):

$$\text{BD} = 0.0016 \cdot z + 0.0359 \quad n = 31 \quad R^2 = 0.60$$

Prévost (2004):

414 jordprov togs i skikten 0-10, 10-20 och 20-30 cm under förnaskiktet på två skogsmarkslokaler i norra Québec, Kanada. Halten organiskt material (OM) varierade från 0.3 – 90.3 % t.s. och volymvikten (BD) från 0.10 – 1.96 g/cm³. Olika funktioner testades (observera att OM i dessa funktioner anges i g/g):

$$\begin{aligned} \ln \text{BD} &= -1.81 - 0.892 \cdot \ln \text{OM} - 0.092 \cdot (\ln \text{OM})^2 & n &= 414 & R^2 &= 0.767 \\ \ln \text{BD} &= -0.98 - 1.104 \cdot \text{OM} - 0.491 \cdot \ln \text{OM} - 0.043 \cdot (\ln \text{OM})^2 & n &= 414 & R^2 &= 0.774 \\ \text{BD} &= (K_1 \cdot K_2) / ((K_2 \cdot \text{OM}) + (1 - \text{OM}) \cdot K_1) & n &= 414 & R^2 &= 0.637 \end{aligned}$$

$K_1 = \text{BD}$ för organiskt material (0.159 g/cm³), $K_2 = \text{bulk densitet}$ för mineraljord (1.561 g/cm³)
OM i g/g

Heuscher m.fl. (2005):

Databasen USDA-NRCS National Soil Survey Characterization Data, med data på markegenskaper från främst USA, användes i denna undersökning. Omkring 47 000 jordprov med uppmätt volymvikt (BD) på mellan 0.25-2.25 g/cm³ utnyttjades. Om bara halten organiskt

kol (OC) användes som oberoende variabel för beräkning av torr volymvikt för alla jordprov var den bästa funktionen följande:

$$BD = 1.6134 - 0.074 \cdot OC^{0.5} \quad n = 47028 \quad R^2 = 0.25$$

Sattes även parametrarna vatteninnehåll (wc; i vikt-%, bestämt vid -15 bar), lerhalt (clay, vikt-%), silthalt (silt; 0.002-0.05 mm, vikt-%) och markdjup (depth, i cm) in i funktionen erhöles följande ekvation, med bästa förklaringsgrad:

$$BD = 1.685 - 0.198 \cdot OC^{0.5} - 0.0133 \cdot wc + 0.0079 \cdot clay - 0.0007 \cdot silt + 0.00014 \cdot depth \quad n = 47015 \quad R^2 = 0.44$$

Om datamaterialet delades upp i olika jordmåner kunde man dock erhålla betydligt bättre samband för enskilda jordmåner.

De Vos m.fl. (2005):

1 614 jordprov från skogsjordar i Flandern, Belgien användes för att testa olika publicerade eller egna framtagna pedotransferfunktioner för beräkning av volymvikt (BD) från halten organiskt material (OM), textur (halten ler, silt eller sand) och markdjup. Proven var tagna på mellan 0.5 till 120 cm djup under markytan, halten organiskt material varierade mellan 0.2-73.5 vikt-% och volymvikten varierade mellan 0.22-1.96 g/cm³. De tolv publicerade pedotransferfunktionerna gav alla i medeltal en något lägre predikterad volymvikt än den uppmätta. Halten organiskt material (OM) var den variabel som hade klart högst förklaringsgrad vid beräkning av volymvikten. Den funktion som gav bäst förklaringsgrad och var enklast hade följande utseende:

$$BD = 1.775 - 0.173 \cdot OM^{0.5} \quad R^2 = 0.57$$

En funktion av samma utseende som Stewarts (Stewart m.fl., 1970) teoretiska tvåkomponentmodell gav en något lägre förklaringsgrad, dock ej signifikant lägre:

$$BD = 100 / ((OM / K_1) + (100 - OM / K_2))$$

$K_1 = BD$ för organiskt material (0.312 g/cm³), $K_2 =$ bulk densitet för mineraljord (1.66 g/cm³) $R^2 = 0.55$

Jensen m.fl. (2005):

Utgående från en dansk pedologisk databas med bl.a. markfysikaliska och markkemiska data från ca 660 jordbruksmarksprofiler, drygt 100 skogsmarksprofiler och ca 50 markprofiler från andra marktyper erhöles följande samband mellan volymvikten (BD, i g/cm³) och halten organiskt material (OM, i vikt-%), samt halterna (vikt-%) av ler (Cl), finsilt (fSi), grovsilt (cSi), finsand (fSa) och grovsand (cSa):

$$BD = -(0.068 \cdot OM) - (0.002 \cdot Cl) - (0.005 \cdot fSi) - (0.007 \cdot cSi) - (0.005 \cdot fSa) - (0.006 \cdot cSa) + 2.157$$

$R^2 = 0.45, \quad n = 2431$

*The present series comprises contribution from Dept. of Forest Site Research,
S-901 83 Umeå, Sweden, Dept. of Forest Soils, S-750 07 Uppsala, Sweden.*

Distribution: see back cover.

1999

80. Berg, B. et al. 1999. *Needle Litterfall in a North European Spruce Forest Transect.*
81. Almberg, Å. Elementhalter i gran- och tallved – variation med boniteten och längs trädstammen. *Element concentrations in stemwood of Norway spruce and Scots pine – variation with site quality and along the tree stem.* Examensarbete

2001

82. Eriksson, H.M. et al. Kolbindning och kvävebalanser i SKA 99.
83. Mendoza Vega, Jorge. *Influence of soil type and land use/land cover on soil organic carbon amounts in Southeast Mexico.* Licentiatavhandling.

2002

84. Wiklander, G. (Red.) Markdagen 2002. Forskningsnytt om mark.
85. Nilsson, T., Nilsson, Å., Larsson, K. Effekter på markkemi, markvegetation och skogsproduktion fem år efter askåterföring till ett tallbestånd i Hälsingland. *Effects on soil chemistry, field vegetation and forest production five years after ash recycling to a pine stand in Hälsingland (central Sweden).*

2003

86. Troedsson, T. Olof Tamm 1891-1973. En kortfattad biografi.

2004

87. Berggren, D., Bergkvist, B., Johansson, M-B., Langvall, O., Majdi, H., Melkerud, P-A., Nilsson, Å., Weslien, P. and Olsson, M. *A description of LUSTRA 's common field sites.*
88. Nilsson, T., Nilsson, Å. och Larsson, K. Tillförsel av barkaska till en blandskog i Medelpad – effekter på markkemi, florans sammansättning och stamtillväxt. *Application of bark ash to a mixed forest in central Sweden – effects on soil chemistry, composition of the flora and stem growth.*
89. Melkerud, P-A. (Red.) Markdagen 2004. Forskningsnytt om mark.

2006

90. Strömgren, M. (Red.) Växthuseffekt och skogsproduktion: Hur skall vi hantera våra dikade skogsmarker? Dokumentation från seminarium och workshop i Stockholm 24 aug 2005. Arrangör: LUSTRA.

Each report in the series SLU-Rapporter from the Faculty of Forestry, Swedish University of Agricultural Sciences, has been authorized by the head of department after consultation with a referee. The aim of the series is to report original research, unpublished elsewhere, by the various departments situated at Uppsala and Umeå.

Distribution

**Inst. för Skoglig Marklära
Sveriges lantbruksuniversitet
Box 7001
S-750 07 Uppsala**