

København den 21.06.2023

Penetrometermodstand i grovsandet underjord tilsat biokul

Af:

Carsten Petersen og Esben Bruun

Institut for Plante- og Miljøvidenskab

Københavns Universitet



Notat om penetrometermodstand i grovsandet underjord tilsat biokul

Nærværende notat bygger på målinger lavet i GUDP-projektet BioAdapt (tilsagn nr. 34009-20-1731) suppleret med udpluk fra relaterede, tidligere studenterprojekter (se referencelisten).

Metoder

I BioAdapt-projektet er der arbejdet med forsøgsjord fra St. Jynde vad som er tilsat 3,00 vægtprocent biokul fra Stiesdal Fuel Technologies pyrolyseanlæg i Brædstrup lavet på hvedehalm og bestående af fem forskellige sigtefraktioner. Herved opnås jordblandingerne J3-J7 (se tabel 1). Der er endvidere målt på jord fra Jynde vad og Billund uden tilsat biokul (hhv. J1 og J2).

Tabel 1. Jordblandinger undersøgt med penetrometer i BioAdapt-projektet. Alle jordblandinger er undersøgt i helt tør tilstand samt i fugtig tilstand ved pF1,7. Dette er kombineret med tre forskellige belastninger af jorden for simulation af forskellig dybde i jordprofilen. Undersøgelsen omfatter således 7 (jordblandinger)*2 (vandindhold)*3 (belastninger)*3 (gentagelser) = 126 forsøgsheder. Dertil kommer separate undersøgelser af effekt af penetreringshastighed.

Behandling (jordblanding)	Beskrivelse	Volumen-vægt, g cm ⁻³
J1	Ren Jynde vad underjord	1,54
J2	Ren Billund underjord	1,56
J3	Jynde vad jord med 3,00 % (m/m) biokul, sigtefraktion < 25 µm	1,53
J4	Jynde vad jord med 3,00 % (m/m) biokul, sigtefraktion 25-45 µm	1,55
J5	Jynde vad jord med 3,00 % (m/m) biokul, sigtefraktion 45-75 µm	1,52
J6	Jynde vad jord med 3,00 % (m/m) biokul, sigtefraktion 75-125 µm	1,49
J7	Jynde vad jord med 3,00 % (m/m) biokul, sigtefraktion 125-180 µm	1,46

Der er tidligere i projektet lavet undersøgelser af hydrauliske effekter af tilsætning af de samme partikelfraktioner af biokul til de samme jorde; disse har vist, at sigtefraktionerne som er mindre end ca. 75 µm har en markant positiv indvirkning på jordens vandretention, mens effekten af fraktionen med de største biokulpartikler er ubetydelig. Grovsandet underjord yder stor mekanisk modstand mod rodvækst, hvilket regnes som den primære årsag til at enårige afgrøder normalt ikke opnår større effektiv rodde dybde end ca. 50 cm uanset deres genetiske potentiale for rodvækst; det antages normalt (og specielt for jorde uden makroporer som de aktuelle sandjorde), at penetrometermodstanden er positivt korreleret med den modstand, der møder en voksende rod. Derfor er det interessant at undersøge, hvordan penetrometermodstanden påvirkes, når disse partikelfraktioner bliver tilsat. Undersøgelserne har især sigtet mod at teste fgl. hypoteser:

1. Tilsætningen af biokul påvirker penetrometermodstanden
 - 1.1. Forskellige partikelstørrelser har forskellig effekt
2. Penetrometermodstanden vokser med voksende simuleret profildybde (vægt placeret på jordprøven mens målingerne foregår)
3. Effekterne af belastning (simuleret profildybde) på penetrometermodstanden er forskellig for tør jord og for fugtig jord som indledningsvis er indstillet til pF1.7.
 - 3.1. Modstanden er størst for fugtig jord og små partikler
4. Penetrometermodstanden er ens i de to modeljorde (Jynde vad og Billund) uden tilsat biokul.
5. Penetreringshastigheden har ikke målbar indflydelse på penetrometermodstanden

Jordblandingerne er fremstillet manuelt i tør tilstand og derpå overført til cylindriske prøvering af stål (h=50 mm; d=80 mm) i en standardiseret proces som sikrer, at volumenvægten af den uberigede Jyndevad-jord kommer til at ligge tæt på det niveau som findes i marken (Bruun et al., 2023; tabel 1). Prøver som skal undersøges i fugtig tilstand indstilles herefter på sandbænk til ligevægt ved pF1,7 (svarende til markkapacitet for uberiget jord). Der er brugt udstyr som illustreret i figur 1. Selve ”spyddet”, der tvinges ned i jorden (herefter kaldet penetrometeret) er af stål og har et rundt, fladt hoved (diameter: 7,22 mm) samt et skaft med væsentlig lavere diameter end hovedet (diameter: 3,0 mm).



Figur 1. Udstyr til måling af penetrometermodstand i jordprøver. Udstyret består (a) af en elektronisk vægt på et ”bord”, som kan forskydes opefter med meget veldefineret hastighed mod et fastmonteret penetrometer-”spyd” (herefter kaldet penetrometer). Med en jordprøve anbragt på vægten som vist i (b) kan man måle penetrometermodstand som funktion af dybde i prøven. Yderligere vægt kan fordeles ensartet på en cirkulær plade anbragt oven på jordprøven (passende til prøvediameteren og med lille hul til penetrometeret) og derved overføres til jorden, hvorved man simulerer forholdene i større jorddybder med større omslutningstryk. Omslutningstrykket påvirker både forskydningsegenskaber (friktion) og pakningsegenskaber og forventes derfor at påvirke penetrometermodstanden. Der er mulighed for at regulere bordets forskydningshastighed og datalogningen via et dedikeret computerprogram, også mens målingerne foregår.

Penetrometermodstanden P (kPa) beregnes af følgende formel:

$$P = (m - m_0) \cdot g / A / 1000$$

hvor

m = den masse, som registreres på vægten (kg)

m_0 = startmassen, dvs. den masse som registreres på vægten inden penetrometeret rører jordoverfladen, inklusiv evt. supplerende vægt anbragt oven på jorden (kg)

g = tyngdeaccelerationen ($= 9,82 \text{ m s}^{-2}$)

A = arealet af penetrometerets endeflade ($= \pi \cdot (0,5 \cdot 7,22 \text{E-}3 \text{ m})^2 = 4,09 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$)

Jorddybden D (mm) bestemmes fra det tidspunkt t_0 , hvor det første gang registreres (på vægten), at penetrometeret rører jordoverfladen:

$$D = v \cdot (t - t_0)$$

hvor

v = bordets opadrettede forskydningshastighed (mm s^{-1})

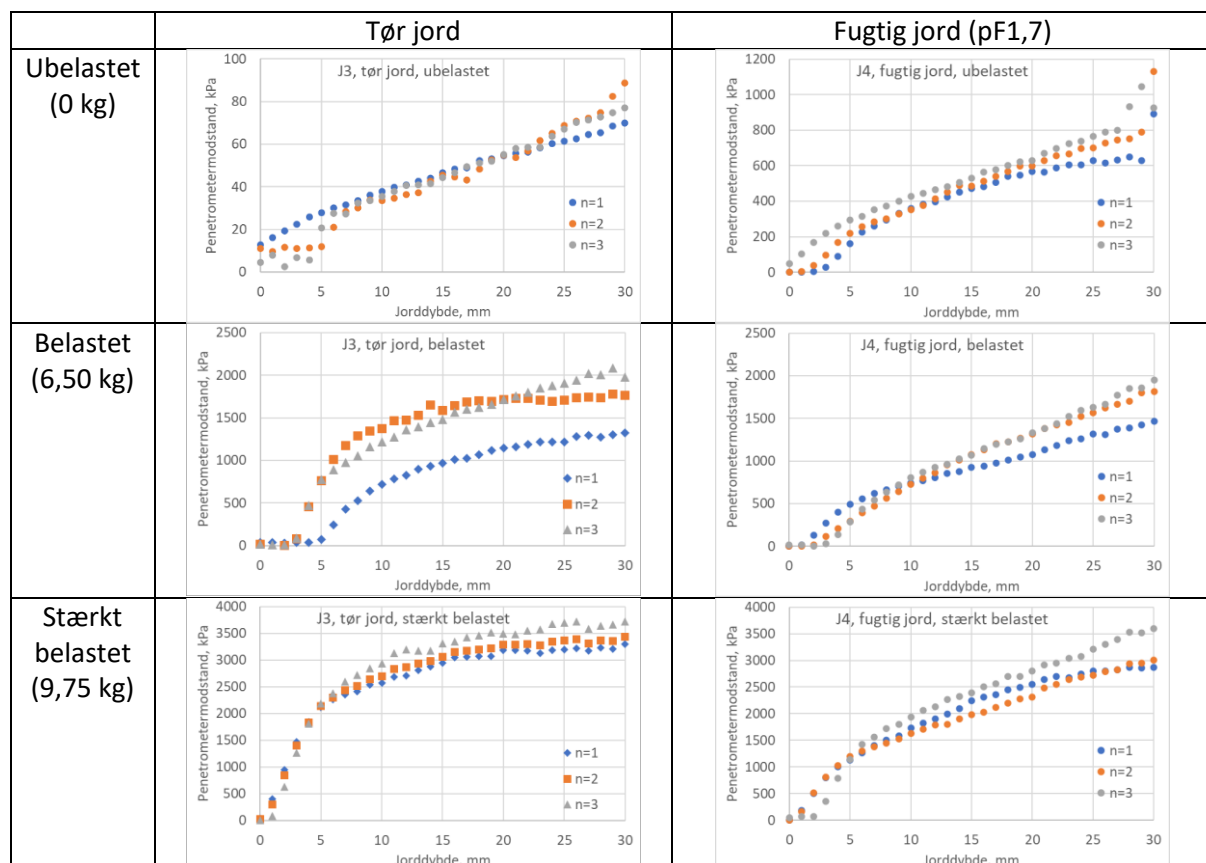
t = tiden (s)

Forskydningshastigheden sættes som standard til $0,10000 \text{ mm s}^{-1}$ ($6,00000 \text{ mm min}^{-1}$). Der gennemføres supplerende forsøg ved seks gange lavere hastighed ($1,00000 \text{ mm min}^{-1}$) for at belyse, om hastigheden har indvirkning på resultaterne.

Penetrometermodstanden er typisk målt over et dybdeinterval fra 0 til 30 mm.

Resultater

Eksempler på målinger foretaget og gemt hver 10. sekund er vist i figur 2 (3 gentagelser). Eksemplerne viser at penetrometermodstanden vokser med dybden, om end mest i starten. I visse tilfælde er modstanden særligt lav og variabel i intervallet 0-5 mm, hvilket kan skyldes at prøvens overflade ikke er helt jævn. I andre tilfælde vokser modstanden abruptt ved dybder over ca. 25 mm. Dette kan skyldes målefejl beroende på at en fast krave på penetrometeret gnider imod kanten af den perforerede plade som er anbragt oven på jordprøven for at fordele supplerende vægt. For at undgå disse fejl bestemmes penetrometermodstanden hørende til hver enkelt måling som gennemsnittet af aflæsninger lavet i dybdeintervallet 5-25 mm. Der er i flere tilfælde (men ikke altid) tegn på en delvis stabilisering af penetrometermodstanden når penetrometeret nærmer sig 25 mm dybde (figur 2). Standardafvigelse og standardfejl bestemmes derpå på basis af gennemsnitsværdier for de 3 gentagelser ($n=3$).



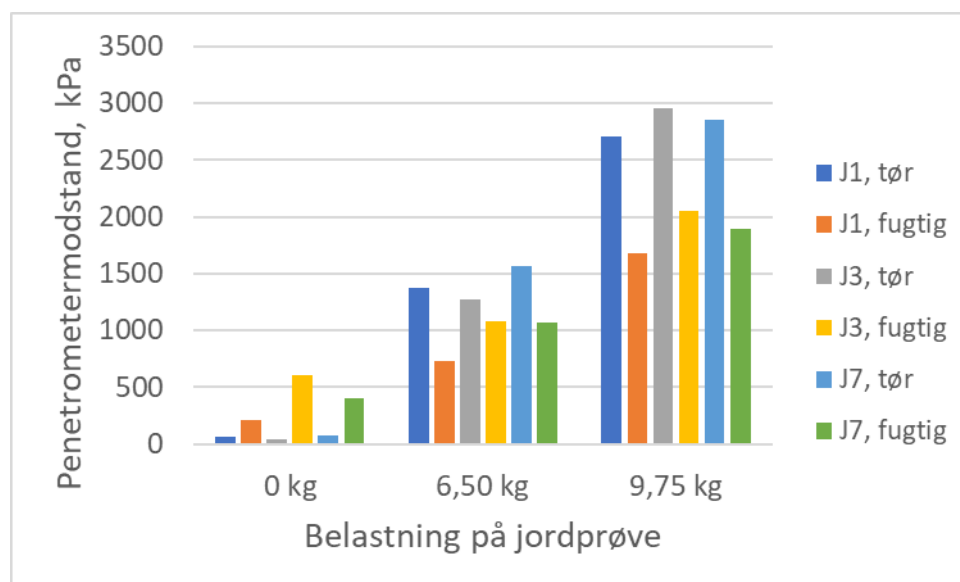
Figur 2. Eksempler på penetrometermålinger lavet i dybdeintervallet 0-30 mm for behandlingerne J3 og J4 i hhv. tør og fugtig tilstand. Eksempler for ubelastet jord, for belastet jord (6,50 kg) og for stærkt belastet jord (9,75 kg).

Penetrometermodstanden vokser stærkt med voksende belastning (voksende simuleret profildybde; Tabel 2). Det ses endvidere, at modstanden er størst (men med lave absolutte værdier) i fugtig jord,

når jorden er ubelastet (svarende til situationen i lille profildybde). Modstanden i fugtig jord er her størst for de jordblandinger (behandlinger) som resulterer i størst vandindhold ved pF_{1,7} (J3 og J4). I belastet jord (6,50 og 9,75 kg) simulerende forholdene i større jorddybde (underjord) er modstanden imidlertid størst når jorden er tør. Her er behandlingseffekterne uklare, når jorden er tør (usystematiske og generelt in-signifikante; se også figur 3). Når jorden er fugtig forøges penetrometermodstanden generelt med tilsætningen af biokul (J1 < J3-J7), men der er ikke systematiske effekter af størrelsen på biokulpartiklerne (J3-J7).

Tabel 2. Penetrometermodstand (kPa) opgjort som gennemsnit af værdier i dybdeintervallet 5-25 mm (gennemsnit (Gns.) og standardfejl (Ste))

Belastning	Vandindh.	Mål	Behandling							Alle beh.
			J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	
0 kg	Tør	Gns.	63	74	45	70	62	82	73	67
		Ste	1	3	1	7	1	2	4	
	Fugtig (pF _{1,7})	Gns.	210	307	602	487	343	314	408	382
		Ste	27	18	77	25	70	46	59	
6,50 kg	Tør	Gns.	1375	1140	1277	1498	1722	1424	1570	1429
		Ste	165	197	201	438	247	198	59	
	Fugtig (pF _{1,7})	Gns.	725	800	1082	992	1263	1313	1074	1036
		Ste	359	125	118	40	299	206	135	
9,75 kg	Tør	Gns.	2703	2081	2953	3408	2070	2496	2858	2653
		Ste	214	366	115	208	454	374	73	
	Fugtig (pF _{1,7})	Gns.	1684	1378	2050	2147	1961	1970	1893	1869
		Ste	346	129	111	104	39	325	228	



Figur 3. Afbildning af udvalgte penetrometermodstands-værdier fra tabel 2 (gennemsnit for dybdeintervallet 5-25 mm og for 3 gentagelser). J1 er Jyndeved-jord uden biokul, J3 er Jyndeved-jord iblandet de mindste biokul-partikler, mens J7 er Jyndeved-jord iblandet de største biokul-partikler (se tabel 1)

Effekter af penetrationshastighed er undersøgt ved at gennemføre nye målinger på J4-blandingen i fugtig tilstand belastet med 6,50 kg. Den hurtige penetration er målt med samme hastighed som hidtil anvendt ($6,00000 \text{ mm min}^{-1}$), den langsomme med 6 gange lavere hastighed. Det fremgår af tabel 3, at hastigheden ikke havde nogen sikker systematisk effekt på målt penetrometermodstand.

	Hurtig penetration ($6,00000 \text{ mm min}^{-1}$)	Langsom penetration ($1,00000 \text{ mm min}^{-1}$)
Gennemsnit, 5-25 mm dybde	972	1190
Standardfejl, Ste	76	114

Tabel 3. Penetrometermodstand (kPa) målt på J4 blandingen i fugtig tilstand (pF1,7) belastet med 6,50 kg. Gennemsnit for dybdeintervallet 5-25 mm målt ved "hurtig" og "langsom" penetration samt standardfejl beregnet for de n=4 gentagelser.

Diskussion

Generelt. Når et penetrometer drives ned i jord opstår der deformationer i form af pakning og forskydning, og modstanden beror på såvel pakning som forskydning (Koolen og Kuipers, 1983). Der må skaffes plads til penetrometeret ligesom det er tilfældet for en rod, når denne vokser. Penetrometermodstanden vokser med dybden (figur 2) selvom hovedet på penetrometeret har mere end dobbelt så stor diameter som skaftet; der er derfor meget lille trykpåvirkning mellem skaft og jord mens målingerne foregår (om nogen overhovedet). Og det antages derfor, at friktion mellem skaft og jord ikke spiller nogen vigtig rolle for den målte modstand. De voksende værdier skyldes primært, at reaktionskræfterne vokser med dybden, at det bliver gradvist vanskeligere at skaffe plads ved at flytte jord væk fra hovedet i takt med at dybden øges. I forsøg hvor dybdegangen blev øget til over 4 cm, dvs. til tæt på prøvehøjden, voksede penetrometermodstanden slutteligt meget kraftigt som tegn på at der skete stærkt forøget pakning af jorden foran hovedet mens målingerne foregik (data ikke vist). Et penetrometer med fladt hoved vil (sammenlignet med et penetrometer med kegleformet hoved) i højere grad koncentrere trykpåvirkningerne i nedadgående retning og i mindre grad ud til siden, og penetrometermodstanden vil være (lidt) større (Bengough et al., 2001). Der opstår en kegle af jordpartikler foran hovedet som forskydes nedad (Koolen og Kuipers, 1983). Modstanden mod forskydning beror især på friktion mellem jordpartiklerne snarere end på friktion mellem stål og jordpartikler. Og den samlede penetrometermodstand beror i højere grad på denne forskydningmodstand samt pakning af jord foran penetrometeret end på lateral pakning og forskydning. Målte penetrometermodstande er typisk væsentlig større end de modstande, der møder en voksende rod (typisk 2-8 gange større afhængigt af mange forhold, herunder måleteknik), hvilket især skyldes, at penetrometeret i højere grad end rødder påvirkes af friktion (Bengough et al., 2001).

Penetrationshastighed. Når jord flyttes ved penetrometerhovedet vil der ske omlejring af såvel faste jordpartikler som vand. Nødvendig omlejring af vandet (som ikke kan komprimeres) kan i jord med lille mættet hydraulisk ledningsevne og højt vandindhold i sig selv føre til, at modstanden vokser med penetrations-hastigheden (Bengough et al., 2001). Derved kan modstandsmålinger med penetrometer føre til fejlfortolkninger fordi målingerne typisk foretages med et penetrometer som er større end rødderne (kræver mere plads og derfor mere omlejring) og med langt højere penetrationshastighed end typiske rodvæksthastigheder. Målinger i nærværende projekt (tabel 3) viser dog, at denne effekt næppe er af betydning i de aktuelle, relativt fugtige sandjorde, som alle har en mættet hydraulisk ledningsevne mindst på niveau med den undersøgte J4 (Bruun et al., 2023). Målingerne bekræfter derved hypotese nr. 5. I litteraturen findes eksempler på at

penetrometermodstanden falder lidt i umættet lerjord og sandblandet lerjord når målingerne gennemføres ved meget lave hastigheder svarende til normale rodvæksthastigheder (Bengough et al., 2001).

Tension, belastning, effektivt tryk og jordens vandindhold. Jordvand under tension skaber et højere "effektivt" tryk mellem de faste jordpartikler, som øger jordens mekaniske styrke. Effekten er en funktion af tensionens størrelse (altså vandets undertryk i forhold til atmosfærens tryk) og vandindholdet (altså det areal i jorden, hvorover trykforskellene manifesterer sig). Det er derfor ikke overraskende, at penetrometermodstanden vokser i den ubelastede jord når jorden fugtes til pF1,7. Ej heller at modstanden er størst i de jorde, som indeholder mest vand ved pF1,7 (J3 og J4). Denne effekt af tension og vandindhold i ubelastet jord (lille dybde) er dog næppe af stor betydning fordi penetrometermodstanden helt generelt er så lille (tabel 2), at den ikke i væsentlig grad påvirker muligheden for rodvækst. I homogen jord som den aktuelle (uden makroporer) mindskes rodvæksthastigheden ganske vist selv ved lav penetrometermodstand, men modstanden regnes først for at være kritisk når den nærmer sig 2000 kPa (Russel, 1977).

Også belastning af jorden skaber et større "effektivt" tryk mellem jordpartiklerne, som ligeledes øger jordens mekaniske styrke. Vi har valgt belastningen 6,50 kg ud fra følgende simple ræsonnement relateret til forholdene i marken (omtrentlig gennemsnitlig volumenvægt 1550 kg m⁻³; 15% vand i gennemsnit):

Trykbelastning grundet vægt af overliggende jord i 75 cm dybde: $(1550 + 0,15 \cdot 1000) \text{ kg m}^{-3} \cdot 0,75 \text{ m} \cdot 9,82 \text{ m s}^{-2} = 12,5 \text{ kPa}$. Dette tryk skabes i prøvecylindrene ved at belaste disse med $12,5 \cdot 1000 \text{ Pa} \cdot (0,040 \text{ m})^2 \cdot \pi / 9,82 \text{ m s}^{-2} = 6,4 \text{ kg}$ (afrundet til 6,5 kg).

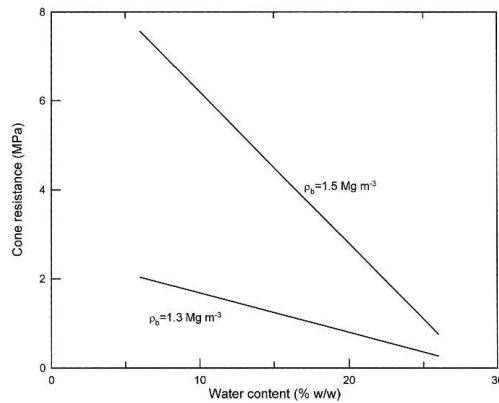
Belastningen forplanter sig i jorden både til siden og nedefter. I laboratoriet bæres en andel af denne belastning af de stive cylindervægge og bunden (som ikke findes under markforhold) således at den ikke fuldtud overføres til jordpartiklerne. Reelt vil belastningen 6,5 kg derfor repræsentere en jorddybde som er mindre end 75 cm (anslået 50 cm dybde). Belastningen 9,75 kg repræsenterer en større jorddybde (anslået 75 cm dybde).

Penetrometermodstanden vokser kraftigt med voksende belastning, altså med voksende simuleret profildybde. Dvs. at målingerne bekræfter hypotese nr. 2. Men det er bemærkelsesværdigt, at effekten af tension på det effektive tryk ikke fuldtud følger med over til den belastede jord, hvor modstanden er størst, når jorden er tør. Selvom jordvandet relativt set har mindre betydning for modstanden i belastet jord end i ubelastet jord (tabel 2) er de absolutte effekter ofte større, og betydningen er sandsynligvis større i belastet jord fordi værdierne er langt større og nærmer sig kritiske niveauer.

Hypotese nr. 3 bekræftes af målingerne idet belastning har markant større effekt i tør jord end i fugtig jord. Men hypotese nr. 3.1 kan kun bekræftes for ubelastet jord. Målingerne viser at modstanden i belastet jord (underjord) er mindst, når jorden er fugtig.

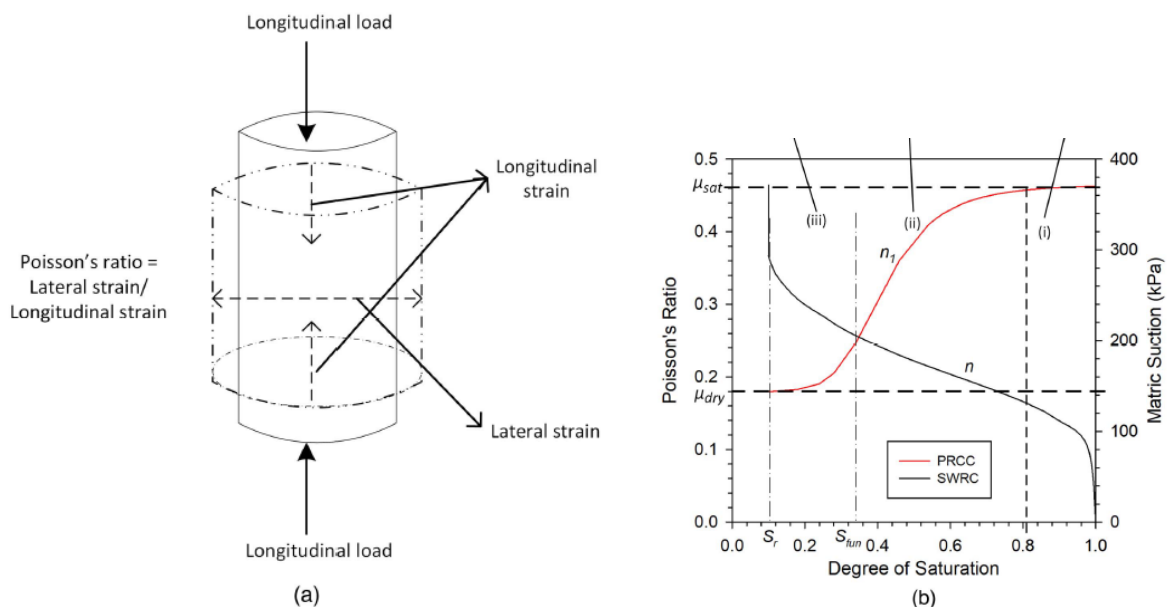
Voksende penetrometermodstand med voksende udtøringsgrad er i overensstemmelse med de generelle erfaringer fra litteraturen (se fx figur 4). Pedersen (2014) målte penetrometermodstand i grovsand fra Jydevad tilføjet finkornet biokul og fandt overensstemmende, at modstanden var større ved pF2,0 end ved pF1,7.

Denne effekt af vandindhold kan muligvis være en vigtig nøgle til forståelse af, hvorfor rødderne synes at vokse bedre i underjord, når der tilføres biokul (Bruun et al., 2014).



Figur 4. Principskitse af penetrometermodstand ("Cone resistance") som funktion af gravimetrisk vandindhold ("Water content (% w/w)") ved 2 forskellige niveauer af volumenvægt (hhv. 1,3 og 1,5 Mg m^{-3}). Både volumenvægt og vandindhold har stor indflydelse på penetrometermodstanden, og der er vekselvirkning mellem de to faktorer; vandindholdet har størst (og meget stor) effekt i pakket jord (efter Bengough et al., 2001).

For belastet jord (underjord) har vandet åbenbart effekter, som sænker penetrometermodstanden med en effektivitet der overstiger de isolerede effekter af tension i kombination med vandindhold på det effektive tryk i jorden. Vandmætningsgraden og vandets tension ("matric suction") har en systematisk indflydelse på det såkaldte Poissonforhold, dvs. størrelsen af forholdet mellem deformationen hhv. vinkelret på akseretningen og i akseretningen under belastning i én dimension (Kumar Thota et al., 2021; figur 5).



Figur 5. Poissonforhold ("Poisson's ratio") i umættet jord. (a): Definition af Poissonforholdet, og (b): Principskitse der viser sammenhænge mellem vandmætningsgrad ("Degree of saturation") og hhv. Poissonforhold (rød kurve) og tension ("Matric Suction"; sort kurve) i en given jordtype. PRCC og SWCC står for hhv. "Poisson's Ratio Characteristic Curve" og "Soil Water Characteristic Curve". Efter Kumar Thota et al. (2021).

Når mætningsgraden (vandindholdet) øges (tension aftager) vokser Poissonforholdet, hvilket er udtryk for at jorden lettere giver efter og deformeres mere lateralt ved en given deformation i

længderetningen. Det betyder i nærværende eksperimenter at der er mindre jord som skal pakkes foran penetrometerhovedet og at deformation i længderetningen kan foregå ved lavere tryk, dvs. at penetrometermodstanden aftager.

Deformationerne har en pendant i trykforplantningen (forplantningen af "stress" i jorden), effekter som i klassisk jordmekanik undertiden udtrykkes ved en "koncentrationsfaktor" (Söhne, 1958). Ved stigende vandindhold i jorden koncentrerer trykket i højere grad centralt under trykgiveren (dæk i klassisk jordmekanik, her penetrometerhovedet) og forplantes i mindre grad ud til siden (fordi jorden i højere grad giver efter; poissonforholdet er større). Herved mindskes reaktionskræfterne og dermed jordstyrken (bæreevnen i klassisk jordmekanik; her penetrometermodstanden).

Det er også vist, at poissonforholdet (alt andet lige og især i sandede jorde) aftager med voksende omslutningstryk (fx Patel et al., 2017). Det betyder i nærværende sammenhæng, at penetrometermodstanden forventes at vokse med profildybden.

I ødometerforsøg, hvor deformationer kun kan foregå i akseretningen og poissonforholdet derfor er 0, fandt Petersen et al. (2016), at tilsætning af biokul øgede både vandretention og komprimerbarhed målt ved fastholdt vandindhold (m/m; svarende til vandretentionen i upakket jord ved pF-værdierne 1,7 og 2,0), men ukontrolleret vandmætningsgrad og tension.

Det er uvist i hvilken grad ovennævnte effekter kan overføres til rodvækst.

Effekter af biokul, herunder partikelstørrelser. Tilsætningen af biokul øger generelt penetrometermodstanden i fugtig jord (tabel 2). Hypotese 1 kan dermed bekræftes. Hypotese 1.1 kan ligeledes bekræftes for ubelastet jord, mens nærværende målinger ikke kan påvise sikre effekter af partikelstørrelsen i belastet jord. At partikelstørrelsen ikke slår igennem for belastet jord kan evt. være udtryk for modsatrettede effekter, fx at små partikler i særlig grad øger modstanden ved at øge det effektive tryk i jorden, mens de lidt større partikler øger modstanden ved at trykpåvirkningerne fra penetrometeret (spændinger eller "stresses") spredes mere ud til siden ligesom i mere tør jord. Det kan også være, at de større partikler i højere grad end de mindre reducerer jordens volumenvægt, hvilket dog burde reducere snarere end øge penetrometermodstanden (figur 4). Volumenvægtmålingerne i nærværende projekt tyder på at det er tilfældet (tabel 1), og forklaringen kunne være, at der ikke i samme grad er plads til de store partikler som til de små i jordens eksisterende porer. Tilsætning af de mindste partikler (i blandingerne J3, J4 og J5) har ingen eller lille effekt på jordens volumenvægt målt med nærværende, standardiserede metode til pakning af prøverne. Tidligere undersøgelser med tilsvarende fugtig og belastet Jyndeved underjord samt en enkelt type af finkornet biokul har vist, at penetrometermodstanden (ligesom vandindholdet) generelt vokser med voksende indhold af biokul (0-4%) (Andersen og Høgh, 2016).

Overfladisk betragtet vil man måske sige, at den øgede penetrometermodstand i beriget, fugtig jord er til ugunst for rodvæksten. Men da vandindholdet er betydeligt højere (især ved tilførsel af store mængder af små biokul-partikler) vil der være mere vand til stede i området ved rodspidserne, som derfor tørrer langsommere ud i forbindelse med røddernes optagelse af vand. Og da modstanden i tør jord er større end modstanden i fugtig jord vil den samlede effekt på penetrometermodstand og ikke mindst rodvækst være uvis. Det forventes, at rodvæksten standser helt alene pga. vandmangel, hvis vandindholdet når en nedre kritisk grænse (visnegrænsen).

Jyndeved- vs. Billundjord. Målingerne viser generelt ikke nogen sikker forskel på penetrometermodstanden i de to uberigede jorde J1 og J2, undtagen måske i den ubelastede situation (tabel 2), hvor modstanden er lav og derfor ikke så vigtig for rødderne. Hypotese nr. 4 kan derfor ikke afkræftes. Jordene er i øvrigt både teksturelt (Bruun et al., 2023) og i forhold til

volumenvægt (tabel 1) meget ens, og der er derfor ikke grund til at antage, at Billund-underjorden vil reagere anderledes end Jyndevad-underjorden på tilsætning af biokul.

Konklusion

Tilsætningen af biokul øger alt andet lige penetrometermodstanden, når jorden holdes fugtig (ved pF_{1,7}). Men da modstanden er større i tør underjord end i fugtig underjord (modstanden aftager generelt med voksende vandindhold) og da vandretentionen er størst når der tilsættes finkornet biokul bliver effekterne på penetrometermodstand og rodvækst uvisse. Højere vandretention modvirker nemlig udtørring af røddernes nære omgivelser, hvilket medvirker til at sikre både rodvækst og rodfunktion. Der kunne for belastet jord (underjord) og alt andet lige ikke dokumenteres nogen sikker effekt af partikelstørrelser.

Ingen målinger af jordstyrke i laboratorie eller felt kan fuldtud belyse den mekaniske modstand mod rodvækst under markforhold, hvilket nødvendiggør, at jordstyrkemålinger suppleres med direkte feltobservationer af, hvordan tilsætningen af biokul til underjord påvirker rødders vækst i dybden.

Litteratur

- Andersen, CB, Høgh, KL. 2016. Potentiale for forbedring af grovsandet underjord ved tilførsel af halmkoks. Effekter på vandretention, penetreringsmodstand og rodudvikling. Bachelorprojekt i Plantevidenskab, Institut for Plante- og Miljøvidenskab, KU. 49 pp.
- Koolen AJ, Kuipers H. 1983. Agricultural Soil Mechanics. Springer-Verlag Berlin, Germany. 241 pp.
- Bengough, AG, Mullins, CE. 1990. Mechanical impedance to root growth—A review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41, 341–358.
- Bengough, AG, Campbell, DJ, O’Sullivan MF. 2001. Penetrometer Techniques in Relation to Soil Compaction and Root Growth. In: KA Smith, CE Mullins (Eds.), *Soil and environmental analysis: physical methods*, pp. 377-403. Marcel Dekker, New York.
- Bruun, EW, Ravenni, G, Müller-Stöver, D, Petersen, CT. 2023. Small biochar particles added to coarse sandy subsoil greatly increase water retention and affect hydraulic conductivity. *Eur. J. Soil Sci.* <https://doi.org/10.1111/ejss.13442>
- Bruun, EW, Petersen, CT, Hansen, E, Holm, JK, Hauggaard-Nielsen, H. 2014. Biochar amendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention. *Soil Use Manag.* 30, 109-118.
- Kumar Thota, S, Duc Cao, T, Vahedifard, F. 2021. Poisson’s ratio characteristic curve of unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(1).
- Patel, A, Ingale, R, Bhanarkar, KB. 2017. Effect of Compaction States and the Confining Pressure on Poisson’s Ratio of Stratified and Non-Stratified Soils. *Arab J Sci Eng* 43, 1983–1999.
- Pedersen, BN. 2014. Biochars påvirkning af mekanisk modstand mod rodvækst i grovsandet underjord. Bachelorprojekt, Institut for Plante- og Miljøvidenskab, KU. 44 pp.

- Petersen, CT, Hansen, E, Larsen, HH, Hansen, LV, Ahrenfeldt, J, Nielsen, H. 2016. Pore size distribution and compressibility of a coarse sandy subsoil with added biochar. *Eur. J. Soil Sci.* 67, 726–736.
- Russell, RS. 1977. *Plant root systems: Their function and interaction with the soil.* McGraw-Hill, London. 298 pp.
- Söhne W. 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agric Eng* 39, 276 - 281, 290.
- Yuan, Y. 2022. *Mechanical Penetration Resistance in Coarse Sandy Soil with added Biochar.* Report from project outside course scope, Department of Plant and Environmental Sciences, KU. 12 pp.