

**Jellegzetes hazai talajok víztartó képességének
számítása és jellemzése talajtérképi információk alapján**

Doktori (PhD) értekezés

Írta:

Tóth Brigitta

Készült a Pannon Egyetem Növénytermesztési és Kertészeti
Tudományok Doktori Iskolájának keretében

Témavezető: Dr. Makó András

Keszthely, 2011

**Jellegzetes hazai talajok víztartó képességének számítása és jellemzése
talajtérképi információk alapján**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:
Tóth Brigitta

**Készült a Pannon Egyetem Növénytermesztési és Kertészeti Tudományok
Doktori Iskolája keretében

Témavezető: **Dr. Makó András**

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)**

A jelölt a doktori szigorlaton%-ot ért el,

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: igen /nem

.....
(aláírás)

Bíráló neve: igen /nem

.....
(aláírás)

***Bíráló neve: igen /nem

.....
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján%-ot ért el.

Készthely,

.....

a Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....

Az EDHT elnöke

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	1
Angol nyelvű kivonat (Abstract).....	2
Francia nyelvű kivonat (Extrait).....	2
1. Bevezetés és célkitűzések.....	3
2. Irodalmi áttekintés	7
2.1. A talaj víztartó képességét becslő módszerek	7
2.1.1. A becslési eljárásokban figyelembe vett talajtulajdonságok.....	12
2.1.2. A talaj víztartó képességét becslő módszerek rendszerezése	14
2.1.2.1. Pedotranszfer függvények.....	15
2.1.2.2. Pedotranszfer szabályok.....	16
2.1.2.3. A becslés típusai	16
2.1.2.4. A becslésekben használt statisztikai módszerek	17
2.1.3. A pedotranszfer függvények alkalmazása és megbízhatóságának vizsgálata.....	20
2.2. Talajfizikai tulajdonságok becslésére szolgáló szoftverek.....	23
2.3. Magyar talajokra kidolgozott víztartó képességet becslő módszerek.....	23
2.4. A becslő módszerek felhasználása	25
3. Anyag és módszer	27
3.1. A vizsgálati adatbázis és adatbázis műveletek.....	27
3.1.1. A vizsgálati adatbázis jellemzői.....	27
3.1.2. A nagyméretarányú genetikus talajtérképek információtartalma	29
3.1.3. A vizsgálati adatbázis előkészítése a kutatás specifikus céljaira.....	32
3.1.3.1. Térképi kódok képzése az adatbázisban szereplő talajadatokra.....	32
3.1.3.2. Az adatbázis szűrése és felosztása	33
3.2. Az alkalmazott vizsgálati és modellfejlesztési módszerek	39
3.2.1. Előzetes vizsgálatok faktoranalízissel	39
3.2.2. Módszerfejlesztés, modellillesztés és validálás	40
3.2.2.1. Általános elvek és módszerválasztás	40
3.2.2.2. CHAID döntési fa alkalmazása a talajvízgazdálkodási modellfejlesztésben	43
3.2.2.3. Modellépítés konvencionális eljárások szerint I: klasszifikációs és regressziós fa (CRT).....	45
3.2.2.4. Modellépítés konvencionális eljárások szerint II: Többszörös lineáris regresszió	47
3.2.2.5. A becslő módszerek pontosságának és megbízhatóságának vizsgálata.....	48
4. Eredmények.....	53
4.1. Az előzetes vizsgálatok eredményei.....	53
4.1.1. Nagy talajváltozatosság alapján végzett faktoranalízis eredménye.....	53
4.1.2. Egyazon főtípusba tartozó talajok faktoranalízisének eredménye	54

4.2.	<i>A módszerfejlesztés eredményei a szikes talajok példáján</i>	56
4.2.1.	Klasszifikációs fa módszerek (CRT és CHAID) eredményei	56
4.2.2.	Pedotranszfer függvények többszörös lineáris regresszióval (LR)	62
4.2.3.	A módszerek összehasonlítása	65
4.2.3.1.	Folytonos és kategória értékek	65
4.2.3.2.	Többszörös lineáris regresszió (LR) és regressziós fa (CRT)	67
4.2.3.3.	Az altípus szerepe	68
4.2.3.4.	Regressziós fa (CRT) és CHAID típusú fa	68
4.2.4.	A becslő módszerek kiválasztása	68
4.3.	<i>Jellegzetes hazai talajok víztartó képesség becslési modelljei</i>	71
4.3.1.	Szikes talajok	71
4.3.1.1.	Szikes talajok víztartó képességének becslése humusztartalom nélkül	71
4.3.1.2.	A szikes talajok víztartó képességében szerepet kapó tényezők értékelése	77
4.3.2.	Barna edőtalajok	79
4.3.2.1.	Becslés klasszifikációs fákkal	79
4.3.2.2.	Pedotranszfer függvények többszörös lineáris regresszióval	81
4.3.2.3.	A módszerek összehasonlítása	84
4.3.2.4.	A barna erdőtalajok víztartó képességében szerepet kapó tényezők értékelése	86
4.3.3.	Csernozjomok	89
4.3.3.1.	Becslés klasszifikációs fákkal	89
4.3.3.2.	Pedotranszfer függvények többszörös lineáris regresszióval	91
4.3.3.3.	A módszerek összehasonlítása	94
4.3.3.4.	A csernozjom talajok víztartó képességében szerepet kapó tényezők értékelése	96
4.3.4.	Réti talajok	98
4.3.4.1.	Becslés klasszifikációs fákkal	98
4.3.4.2.	Pedotranszfer függvények többszörös lineáris regresszióval	100
4.3.4.3.	A módszerek összehasonlítása	103
4.3.4.4.	A réti talajok víztartó képességében szerepet kapó tényezők értékelése	105
4.4.	<i>A talajok csoportosításának hatása a becslésre</i>	108
4.4.1.	A teljes adatbázisra és külön a talajcsoportokra kidolgozott pedotranszfer függvények eredményeinek összehasonlítása	108
4.4.2.	A teljes adatbázisra és külön a talajcsoportokra kidolgozott regressziós fák eredményeinek összehasonlítása	111
4.5.	<i>A vizsgált talajtulajdonságok szerepe a becslésben</i>	114
4.5.1.	Fizikai féleség	114
4.5.2.	Mechanikai összetétel	114
4.5.3.	Humusztartalom	114
4.5.4.	Kalcium-karbonát tartalom	115
4.5.5.	pH érték	115
4.5.6.	Sótartalom	115
4.5.7.	A talaj altípus szerepe	116
4.5.8.	Feltalaj és altalaj megkülönböztetése	116
4.5.9.	Térfogattömeg	116

4.6.	<i>A víztartó képesség becslésének jellegzetességei a különböző mátrixpotenciál értékeken</i>	118
4.6.1.	Maximális vízkapacitás	118
4.6.2.	Szabadföldi vízkapacitás	119
4.6.3.	Alacsony mátrixpotenciálok víztartó képessége	120
4.6.4.	Hasznosítható vízkészlet	121
4.7.	<i>A különböző becselő módszerek alkalmazásának tapasztalatai</i>	124
4.7.1.	Kategória típusú input paraméterek	125
4.7.2.	Folytonos típusú input paraméterek	126
4.7.3.	Vegyes – folytonos és kategória – típusú input paraméterek	127
4.7.4.	Az adatbázis előzetes csoportosítása	128
4.8.	<i>Módszerajánlás</i>	130
5.	Összefoglalás	133
6.	Új tudományos eredmények	135
7.	Irodalomjegyzék	137
8.	Köszönetnyilvánítás	149
	Mellékletek	151

Rövidítések jegyzéke:

Általános:

BET: barna erdőtalajok

CHAID: khí négyzet statisztikai vizsgálaton alapuló döntési fa (Chi-squared Automatic Interaction Detector)

CRT: regressziós fa (Classification and Regression Tree).

DV: diszponibilis víztartalom vagy hasznosítható vízkészlet, a növények által felvehető vízmennyiség ($VK_{sz} - HV$).

LR: többszörös lineáris regresszióval kidolgozott becslő modell.

PTF: pedotranszfer függvény.

PTSZ: pedotranszfer szabály (pedotransfer rule (PTR)).

A statisztikai vizsgálatokhoz:

CHAID1: CHAID típusú fával kidolgozott becslő módszer, független változói kategória típusúak, melyek a térképi kódoknak felelnek meg: altípus, szerves anyag tartalom, fizikai féleség, pH, kalcium-karbonát tartalom és vízdoldhatóság-tartalom kategóriái.

CHAID2*: CHAID típusú fával kidolgozott becslő módszer, független változói kategória típusúak, melyek a térképi kódoknak felelnek meg: altípus, szerves anyag tartalom, fizikai féleség, pH, kalcium-karbonát tartalom kategóriái, valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetését.

CRT_kat: regressziós fával kidolgozott becslő módszer, független változói kategória típusúak, melyek a térképi kódoknak felelnek meg: altípus, szerves anyag tartalom, fizikai féleség, pH, kalcium-karbonát tartalom kategóriái, valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetését (szikes talajoknál a vízdoldhatóság-tartalom kategóriái is, de a feltalaj és altalaj megkülönböztetése nélkül).

CRT1: regressziós fával kidolgozott becslő módszer, független változóként az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %), vízdoldhatóság-tartalmat (tömeg %) és pH_{H_2O} -t tartalmazza.

CRT2: regressziós fával kidolgozott becslő módszer, független változóként a CHAID1 modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus kivételével - folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %), vízdoldhatóság-tartalmat (tömeg %) és pH_{H_2O} -t.

CRT3*: regressziós fával kidolgozott becslő módszer, független változóként a CHAID2 modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus és az altalaj és feltalaj megkülönböztetése kivételével - folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát tartalmat (tömeg %) és pH_{H_2O} -t.

LR1: az A, B és C szintekre többszörös lineáris regresszióval kidolgozott becselő módszer, független változóként az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát tartalmat (tömeg %) és pH_{H2O}-t tartalmazza. Szikes talajoknál a vízdhatóság-tartalmat is (tömeg %).

LR2*: az A, B és C szintekre többszörös lineáris regresszióval kidolgozott becselő módszer független változóként az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) tartalmat, pH_{H2O}-t és térfogattömeget (g cm⁻³) tartalmazza. Szikes talajoknál a vízdhatóság-tartalmat is (tömeg %).

LR1_AB: A és B szintekre többszörös lineáris regresszióval kidolgozott becselő módszer, független változóként azon talajtulajdonságok, melyek a nagyméretarányú talajtérképeken fel vannak tüntetve, de azokat folytonos értékekkel jellemzik,

LR2_AB: A és B szintekre többszörös lineáris regresszióval kidolgozott becselő módszer, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a térfogattömeget is figyelembe vevő becselő módszer

LR3_AB: A és B szintekre többszörös lineáris regresszióval kidolgozott becselő módszer, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdhatóság-tartalmat is figyelembe vevő becselő módszer.

LR4_AB: A és B szintekre többszörös lineáris regresszióval kidolgozott becselő módszer, az LR2_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdhatóság-tartalmat is figyelembe vevő becselő módszer.

ME: átlagos hiba (tf%).

RME: átlagos relatív hiba (%).

RMSE: átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke (tf%).

$\theta_{-0,1\text{kPa}}$: nedvességtartalom -0,1 kPa mátrixpotenciálón.

$\theta_{-33\text{kPa}}$: nedvességtartalom -33 kPa mátrixpotenciálón.

$\theta_{-1500\text{kPa}}$: nedvességtartalom -1500 kPa mátrixpotenciálón.

$\theta_{-150000\text{kPa}}$: nedvességtartalom -150000 kPa mátrixpotenciálón.

* Kivéve azon szikes talajok vizsgálatánál, ahol a szerves anyag tartalmat nem tüntetik fel a nagyméretarányú térképeken. Ezen eseteknél lásd a táblázat alatti magyarázatot.

Kivonat

Jellegzetes hazai talajok víztartó képességének számítása és jellemzése talajtérképi információk alapján

A doktori kutatás fő célja egy olyan, talajtérképi kategória típusú információkon nyugvó, és a jellegzetes hazai talajok adatain kidolgozott, víztartó képesség-becslő módszer kifejlesztése volt, ami mintát adhat bármely hazai, vagy külföldi talajféleség víztartó képességének – kategória adatokon nyugvó – számszerű becsléséhez. A vizsgálatokat a Magyarországi Részletes Talajfizikai Adatbázis (MARTHA) tette lehetővé.

A szerző a nagyméretarányú (1 : 10000) talajtérképeken és kartogramokon található kategória típusú információk (fizikai féleség, szerves anyag tartalom, kalcium-karbonát tartalom, vízdoldhatóság-tartalom, pH és a talaj altípusa) alapján, regressziós fa módszerrel és a nemzetközi talajfizikai kutatásban újdonságnak számító, CHAID (Chi-squared Automatic Interaction Detector) típusú döntési fával dolgozta ki a víztartó képességet becslő pedotranszfer szabályokat.

A dolgozatban a talajtérképeken feltüntetett talajtulajdonságok folytonos változóinak vizsgálata is bemutatásra került. A víztartó képesség becslését, folytonos értékek és a talaj altípusa alapján, a szerző többszörös lineáris regresszióval és regressziós fákkal fejlesztette ki, vizsgálva az adatbázis előzetes csoportosításának az előnyeit és hátrányait. Elemezte továbbá a talaj altípus szerepét a víztartó képesség becslésében.

A kidolgozott becslő módszerek becslési pontosságát (0,8-5,6 tf%) és megbízhatóságát (0,8-8,5 tf%) jellemző négyzetes eltérés gyökök értéke (RMSE) hasonló a szakirodalomban fellelhető módszerek RMSE értékeivel (4-5 tf%). A kidolgozott módszereknél általánosságban elmondható, hogy a folytonos értékek ugyan kisebb RMSE értékeket eredményeznek, mint a kategória típusú változók, de a különbség csak néhány esetben szignifikáns.

A dolgozatban bemutatott CHAID módszer alkalmas a hazánkban előforduló jellegzetes talajok nevezetes mátrix potenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékeinek becslésére – a nemzetközi szakirodalomban elfogadott hibaértékeken belüli pontossággal és megbízhatósággal – a nagyméretarányú talajtérképek kategória információi alapján.

A talaj altípusa, mechanikai összetétele, szervesanyag-tartalma, kalcium-karbonát tartalma, és pH értéke alapján kidolgozott regressziós fák (pedotranszfer szabályok) és a többszörös lineáris regresszióval becslő pedotranszfer függvények hasonló pontosságú és megbízhatóságú becsléseket eredményeznek.

A disszertáció bemutatja az egyes talajcsoportokon belül a vízháztartásra ható talajjellemzők egyedi kapcsolatrendszerét, valamint a talajtulajdonságok és a víztartó képesség kapcsolatának számszerűsített összefüggéseit.

A kidolgozott modellek közvetlenül alkalmazhatók a mezőgazdasági és természetvédelmi tervezésben, a talajok és vízkészletek jobb hasznosítása érdekében.

Angol nyelvű kivonat (Abstract)

Calculation and characterization of water retention of major Hungarian soil types using soil survey information

Soil water retention of chernozems, brown forest soils, meadow soils and salt affected soils at -0.1, -33, -1500 and -150000 kPa matric potentials and available water content were estimated from information available in the Hungarian Detailed Soil Hydrophysical Database. Estimations used soil properties displayed on the 1:10000 scale Hungarian soil maps. Ordinal and nominal type of variables (texture, organic matter content, calcium carbonate content, soluble salt content, pH and soil subtype classes) were used to develop prediction methods. Three type of pedotransfer rules (PTR) were established by classification tree (CRT and CHAID) methods and four different continuous pedotransfer functions (PTF) were established using multiple linear regression method. The prediction methods were developed using (1) continuous type input parameters, (2) continuous type input parameters and additional soil taxonomical information and (3) categorical type input parameters. Models based on continuous type input parameters were established as well with and without preliminary grouping of the dataset. Water management of different soil types are characterized and water retention prediction models are provided. The established models can be readily used to prepare available water content maps based on soil survey information.

Francia nyelvű kivonat (Extrait)

Calcul et caractérisation de la rétention en eau des principaux types de sol hongrois en se basant sur les cartes des sols

Les propriétés de rétention en eau à différents potentiels matriciels (-0.1, -33, -1500 and -150000 kPa) ainsi que la teneur en eau utile de chernosols, de sols bruns forestiers, de sols de prairie et de sols affectés par les sels sont estimées à partir de la base de données hydrophysiques détaillée des sols hongrois (Hungarian Detailed Soil Hydrophysical Database). Les estimations sont basées sur des cartes de sols hongroises au 1:10000. Des variables ordinales et nominales (granulométrie, teneurs en matière organique, en carbonate de calcium, en sels solubles, pH et classes de sous-types de sols) sont utilisées pour développer des méthodes de prédiction. Trois types de classes de pédotransfert (PTR) sont établies grâce à des méthodes de classification (CRT et CHAID) et quatre différentes fonctions de pédotransfert continues (PTF) sont établies par régressions linéaires multiples. Les méthodes de prédiction sont développées sur base (1) de paramètres d'entrée continus, (2) de paramètres d'entrées continus et d'information supplémentaire sur la taxonomie des sols ou (3) de paramètres d'entrée catégoriques. Les modèles basés sur les paramètres d'entrée continus sont de plus établis avec et sans groupement préalable des données. La gestion de l'eau de différents types de sols est caractérisée et des modèles de prédiction de la rétention en eau sont proposés. Les modèles établis peuvent être directement utilisés pour préparer des cartes d'eau utile basées sur les relevés pédologiques.

1. Bevezetés és célkitűzések

A talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak ismerete a mezőgazdaság kezdetei óta a művelés tervezésének egyik központi eleme volt. A talajművelési eljárások, a vetés vagy az öntözés időzítése és módja, a kiadott trágya mennyisége és minősége mind a talaj vízellátottsági állapotának és annak várható változásának függvénye. Az évszázados tapasztalati ismereteket a modern mezőgazdálkodás tervezésében a számszerűsített információk egészítik ki, váltják fel. A mért, vagy számított adatokon alapuló pontos információ a változó környezeti körülmények között egyre fontosabbá válik.

A klímaváltozás, a területhasználat változása, a talajvízszint ingadozása olyan környezeti változások, amik nem csupán a mezőgazdasági termelés lehetőségeit befolyásolják, de a föld biogeokémiai rendszerének minden elemére hatással vannak. A talaj ebben a rendszerben számos olyan funkciót tölt be amelyek teljesítése szoros összefüggésben áll a talaj vízgazdálkodási tulajdonságaival (Várallyay, 1997, 2002a; Blum, 2005).

A talajok multifunkcionalitásának előtérbe kerülésével a talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak hagyományos, kizárólag a mezőgazdasági termelés szempontjából vizsgált szerepét egy összetettebb megítélés váltotta fel. Ebben már olyan szempontok is felmerülnek, mint például a talajok (mikro)biológiai sokféleségének viszonya a talaj vízellátottságához (Bronick és Lal, 2005; Entry et al., 2008), a szennyező anyagok sorsának talajvíztől való függősége, vagy például a talaj és talajvíz üvegház hatású gázok kibocsátásával való kapcsolata (Láng et al., 2004).

Ugyanakkor a rendszerszemléletű újabb értékelésekben is megmaradnak a talajok vízgazdálkodásával kapcsolatos alapkérdések: miképp tudja befogadni a talaj a felszínére érkező vizet? Milyen irányban várható a talajra érkező víz további útja? Mennyi vizet képes raktározni az adott talaj? Milyen erők hatnak a talaj vízkészletére? A talajban lévő vízből mennyit tudnak hasznosítani a növények?

Ezek a kérdések két nagy csoportra oszthatók: a talajra érkező és a talajban lévő víz mozgásával, valamint a talaj víztartó képességével kapcsolatos kérdések csoportjaira. Az egyes kérdésekre adott válaszok bizonyos esetekben önmagukban is gyakorlati jelentősséggel bírnak, míg más esetekben azok együttes értékelésére van szükség. Míg például a víztartó képességéből egyszerűen számolható a növények számára hasznosítható víztartalom, vagy például a telítetlen talaj felszíni beszívargási együtthatója (a domborzati paraméterekkel kiegészítve) a felszíni elfolyás megítéléséhez nyújt közvetlen információt, addig olyan kérdések megválaszolásához, mint például egy terület árvíz- vagy belvízveszélyeztetettsége, vagy a felszín alatti vizek szennyezési kockázatai csak a statikus és dinamikus vízállapotok együttes értékelésével válaszolhatók meg.

Doktori kutatásaim során a **talajok víztartó képességével** kapcsolatos elemzéseket folytattam. A vízmozgás folyamatainak leírása tehát nem tartozott kutatási feladataim közé. Vizsgálataim során különböző módszereket dolgoztam ki a jellegzetes hazai talajok különböző mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képességének becslésére.

Munkám előzményét az elmúlt évtizedek hazai talajfizikai kutatásai jelentették, aminek gyökerei egészen a XIX. századi talajművelési-növénytermesztési megfigyeléseihez nyúlnak. A

kezdeti gyakorlati talajművelési kutatások a talajállapot és nedvességforgalom összefüggéseinek tapasztalati értékelését jelentették. Nagy magyar növénytermesztők sora (Nagyváthy, 1821; Cserhádi, 1894, 1905; Grábner, 1942) tért ki munkája során a talajban lévő víz mennyiségének fontosságára, a különböző talajok eltérő művelhetőségére és ennek vízforgalmi tényezőire (Manninger, 2002; Kemenes, 1964).

A talajtulajdonságok és víz kapcsolatának szisztematikus felmérése és kutatása a XX. század második felében a mérési és adatfeldolgozási módszerek fejlődésével kapott lendületet. Az ezredfordulóra több olyan eljárást dolgoztak ki hazánkban ill. hazai szakemberek közreműködésével (Pachepsky et al., 1999; Nemes, 2003; Rajkai 2004; Makó, 2005) amikkel - könnyen hozzáférhető talajparaméterek alapján - a talajok hidrofizikai tulajdonságait lehet számszerűen becsülni.

Ezt megelőzően Várallyay és munkatársai elkészítették a hazai talajainknak - az országos áttekintésű térképek információira alapozó - vízgazdálkodási tulajdonságait összefoglaló kategóriarendszerét, valamint a kategóriarendszer alapján rajzolt talaj-vízgazdálkodási térképet (Várallyay et al., 1980). Magyarország talajainak vízraktározó képességéről, és az azt befolyásoló tényezőkről ugyancsak Várallyay (2005) közölt átfogó ismertetést, egyben a vízgazdálkodás gyakorlati alkalmazásaira is kitérve.

Az itt vázolt kutatási folyamatba illeszkedően doktori kutatásomban olyan módszertani fejlesztést céloztam meg, ami ugyancsak közvetlenül segítheti a talajhasználat gyakorlatát. Munkám tervezésekor abból indultam ki, hogy a talajhasználati gyakorlatot meghatározó döntések ideális esetben helyi információra alapulhatnak. Kézenfekvőnek tűnt tehát a helyi talajtani információkat összegző, nagyméretarányú (1:10.000 léptékű) talajtérképek (Baranyai, 1988) információtartalmának felhasználása. Éppen ezért, legfőbb kutatási célkitűzésem is arra irányult, hogy a rendelkezésre álló részletes talajvízgazdálkodási adatbázis (Makó et al., 2010) alapján olyan összefüggéseket keressek, amik a nagyméretarányú talajtérképeken is szereplő talajjellemzők, ill. azok kategóriái vízgazdálkodásra gyakorolt hatását számszerűen mutatják, írják le. Az így kidolgozott becslési eljárással aztán a nagyméretarányú talajtérképek információit felhasználva nagy térbeli részletességgel és számszerűen jeleníthetők meg térképeken is a talaj víztartó képességének jellemzői.

A hagyományos talajtérképek (Baranyai, 1988), amik az ország mezőgazdasági területeinek mintegy 70%-ára állnak rendelkezésre (Jones et al., 2005; Tóth és Máté, 2006), a talajjellemzők kategóriáit jelenítik meg. Ezért elsődleges célom olyan eljárás kidolgozása volt, ami statisztikai elemzések alapján a talajtérképi kategóriák természetben előforduló kombinációinak, vagyis a taxonómiai talajváltozatok víztartó képességére adnak számszerű becslést.

A hagyományos talajfolt-térképek és azok digitalizált vektoros adatbázisainak felhasználása mellett a jövőben várhatóan egyre nagyobb szerepet kapnak a folytonos talajparamétereket megjelenítő digitális térképek is (Boettinger et al., 2010; Dobos et al., 2005). Ezért munkám során a folytonos talajjellemzők alapján becsülhető víztartó képesség meghatározását is célul tűztem ki.

A különböző módszerek összehasonlíthatósága érdekében a folytonos és kategória változókon alapuló becslést ugyanazon talajjellemzőkre kívántam vizsgálni.

Munkám során nem vállalkozhattam a magyarországi talajok teljes változatosságának részletes vízgazdálkodási jellemzésére. Az új módszer fejlesztése, illetve a kifejleszteni célzott

módszer meglévő eljárásokkal való összehasonlítására négy jellegzetes főtípus talajait választottam ki.

Munkahipotézisem szerint a nagyméretarányú térképeken feltüntetett talajjellemző kategóriák információtartalma a víztartó képesség megfelelő pontosságú becsléséhez jó alapot jelenthet. Ez a fajta becslés a nemzetközi és hazai szakirodalomban elterjedt, és a folytonos változókat alkalmazó eljárások egyenértékű alternatíváját nyújthatja.

Kutatómunkám fő célja tehát egy olyan, talajtérképi kategória típusú információkon nyugvó, és a jellegzetes hazai talajok adatain kidolgozott, víztartó képesség-becslő módszer alkalmazása, ami mintát adhat bármely hazai, vagy külföldi talajféleség víztartó képességének – kategória adatokon nyugvó – számszerű becsléséhez.

További célom volt elkészíteni négy jellegzetes talajfőtípus (szikesek, erdőtalajok, csernozjomok és réti talajok) talajtérképeken előforduló változatainak a kutatásban és gyakorlatban négy gyakran használt nedvességpotenciál értékéhez (maximális vízkapacitás, szabadföldi vízkapacitás, holtvíztartalom és higroszkóposág) tartozó víztartó képesség becslő modelljeit.

Kutatási célkitűzéseim kijelölése után, azokhoz kapcsolódóan az alábbi kérdéseket fogalmaztam meg, amik megvizsgálása, megválaszolása szükségesnek látszott a munkahipotézis helyességének ellenőrzéséhez:

- 1) A talajtérképezésnél is felhasznált genetikai talajosztályozás különböző taxonómiai szintjeibe sorolt talajegységekkel jellemzett tulajdonság-együttesek hordoznak-e a vízgazdálkodási tulajdonságok szempontjából is értékelhető információt? (A talaj elnevezése utal-e a vízgazdálkodási tulajdonságára, ill. a különböző talajok vízgazdálkodása között, „csupán elnevezésüket tekintve”, lehet-e bármiféle különbség?)
- 2) Lehetséges-e olyan, megbízható víztartó képesség becslő eljárást kidolgozni, ami a talajtérképek kategória információira is alkalmazható?
- 3) Milyen pontossággal írható le pusztán kategória adatok alapján a talajok víztartó képessége, illetve ez a pontosság a folytonos változókkal becsült értékekhez képest milyennek értékelhető?
- 4) A talajfizikai kutatásban újdonságnak számító CHAID módszer használata előnyt jelent-e a regressziós fákkal szemben?
- 5) Befolyásolja-e az adatbázis előzetes csoportosítása a becslő módszerek pontosságát és megbízhatóságát?
- 6) Miként alakul a különböző nedvességpotenciál értékekre kidolgozott becslő modellek pontossága és megbízhatósága, van-e ezek között különbség (akár a nedvesség potenciál értékeket, akár a becslő eljárásokat tekintve), és ha igen, azok milyen okokra vezethetők vissza?
- 7) Milyen különbségek mutatkoznak a jellegzetes hazai talajfőtípusaink változatainak víztartó képességében és ezek a különbségek miként értelmezhetők?

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A talaj víztartó képességét becslő módszerek

A talaj vízháztartásától függ a természetes vegetáció és a termesztett növények vízigényének kielégíthetősége, emellett szerepet játszik a talaj levegő- és hőháztartásának, a biológiai aktivitás mértékének és a tápanyagforgalomnak a kialakításában. Befolyásolja a talaj szerkezeti, technológiai tulajdonságait, így meghatározza a talajművelés idejét, típusát, valamint hatással van a talaj stresszhatásokkal szembeni pufferképességére is (Várallyay, 2004, 2005a, b). Mivel a talaj vízgazdálkodási és fizikai tulajdonságai kulcsfontosságúak a talaj-növény kölcsönhatásokban, ezért ezek ismerete nélkülözhetetlen a talaj termőképességét fenntartó földhasználat tervezéséhez is (Tóth et al., 2006). A növénytermelés stabilitása a talaj vízgazdálkodási tulajdonságainak megőrzésével és javításával biztosítható (Farkas et al., 2005; Várallyay, 2005). A talaj vízháztartását leíró tulajdonságok egyike a talaj víztartó képessége, mely lehetővé teszi, hogy a talajba be-, odaszivárgó nedvesség akár hosszabb ideig is raktározódjon a talajban. A talajnedvesség mennyisége önmagában még nem határozza meg a növények számára felvehető vízmennyiséget, ez függ még a talajnedvesség halmazállapotától és a talaj nedvességgpotenciáljától. A nedvességgpotenciál írja le, hogy a talajnedvesség mely része milyen erők hatása alatt áll. A talajnedvesség összpotenciálja (Ψ_t) a nehézségi erők hatását kifejező gravitációs potenciál (Ψ_g), a hidrosztatikus nyomáskülönbséget kifejező nyomáspotenciál (Ψ_p), a szilárd fázis integrált hatását (kapilláris erők és adszorpciós erők) kifejező mátrixpotenciál (Ψ_m), valamint az oldható sók és a disszociáló adszorbeált ionok koncentrációkülönbségéből adódó ozmózispotenciál (Ψ_s) algebrai összege [(1) egyenlet]:

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_s \quad (1)$$

A fenti alapegyenlet leegyszerűsíthető, így a talajnedvesség energiaállapota legtöbbször jól jellemezhető a mátrixpotenciál (Ψ_m) mértékével. Használatának megkönnyítésére bevezetésre került a pF érték, mely a mátrixpotenciál vízoszlop cm-ben kifejezett értékének a negatív logaritmus.

A talaj víztartó képessége a különböző nedvességgpotenciálokhoz tartozó nedvességtartalmakkal jellemezhető (2.1. táblázat). Ilyenek például a pF0 értékhez tartozó maximális vízkapacitás (VK_{max}); a pF2 értékhez tartozó minimális vízkapacitás (VK_{min}); a pF2,5 értékhez tartozó szabadföldi vízkapacitás (VK_{sz}); a pF4,2 értékhez tartozó holtvíztartalom (HV); a hasznosítható vízkészlet (DV), a növények által felvehető vízmennyiség ($VK_{sz} - HV$); valamint a pF6,2 értékhez tartozó higroszkópos nedvesség (Várallyay, 2002b).

2.1. táblázat. A különböző mértékegységekkel jellemzett szívóerők és a mátrixpotenciál megfeleltetése

Nedvességtartalom elnevezése	Szívóerő		Mátrixpotenciál
	pF értékben	vízoszlop cm-ben	kPa-ban
maximális vízkapacitás	pF 0	1	-0,1
	pF 0,4	2,5	-0,25
	pF 1	10	-1
	pF 1,5	32,6	-3
	pF 2	100	-10
	pF 2,3	200	-20
szabadföldi vízkapacitás	pF 2,5	326	-33
	pF 2,7	500	-50
	pF 3,4	2512	-250
holtvíz tartalom	pF 4,2	15850	-1500
higroszkópos nedvesség	pF 6,2	1584893	-150000

A talaj víztartó képességének mérése költséges, munka- és időigényes. Ugyanakkor lehetőség van arra, hogy egyszerűbben mérhető talajtulajdonságok alapján ezeket becsléssel határozzuk meg. A talajtani kutatások során kapott becslő függvényeket *pedotranszfer függvényeknek* (PTF) hívja a szakirodalom. A meghatározást az angol „pedotransfer function”-ból vették át, mely a Lamp és Kneib (1981) által használt „pedofunction” és a Bouma és van Lanentől (1987) származó „transfer function” fogalmakból alakult ki. A pedotranszfer függvény definícióját Bouma (1989) fogalmazta meg először, miszerint a függvény segítségével a rendelkezésre álló információkból olyan adatokat lehet előállítani, amelyek elsődleges mért forrásból nem hozzáférhetőek. A PTF-ek többségét a talaj vízgazdálkodási tulajdonságainak becslésére dolgozták ki, de léteznek a talaj egyéb fizikai és kémiai jellemzőit számító módszerek is. Rawls (1983) például a talajok térfogattömegére dolgozott ki becslő módszert; a talajok szerves folyadék visszatartó képességét Makó (2002) pedotranszfer függvénnyel becsülte; Uno és munkatársai (2005) távérzékelte információkból becsülték a talajok szervesanyag-tartalmát; Bell és van Keulen (1995, cit: Minasny, 2007) a talajok kationkicserélő képességének becslésére dolgoztak ki módszert. A hiányzó adatokat egyre gyakrabban helyettesítik becsült értékkel a talajtani kutatásban. A mezőgazdasági és a környezeti modellezéshez szükséges hiányzó adatok pótlására azok pedotranszfer függvényekkel történő becslése megoldást jelenthet. Ugyanakkor mindig szem előtt kell tartani, hogy a becsült érték hibája ismereten, így a modellezési eredmények csak közelítő jellegűek, és azok szakértők általi felülvizsgálata elmaradhatatlan feladat.

A becslő módszerek alkalmazása nem újkeletű, annak ellenére, hogy a PTF fogalma csak 1989 óta létezik. Már korábban is igény volt rá, hogy a nehezen mérhető talajtulajdonságokat egyéb, könnyebben meghatározható adatokból számítsák. Várallyay és munkatársai (1979) az 1970-es évekkel bezárólag, Minasny (2007) pedig napjainkig tekinti át a becslő módszerek kidolgozásának történetét, felsorolva a főbb eredményeket. Az ő munkájukat is felhasználva tekintem át az első talajfizikai PTF-ek megalkotásától napjainkig terjedő időszak becslő módszereit.

Briggs és McLane (1907) voltak valószínűleg az elsők, akik a mechanikai összetétel és szerves anyag alapján becsülték a „talajnedvességi egyenértéket” (*moisture equivalent*): a talajkapillárisok által visszatartott egyensúlyi talajnedvességet, amit a minta 30 perces, tömegállandóságáig történő percenkénti 5000 fordulat (a gravitációs erő 3000-szerese) centrifugálásával érnek el. Ez az érték a mai terminológia szerint közelítőleg a szabadföldi vízkapacitásnak felel meg.

Adatbázisuk 104 mintájának elemzése alapján a „talajnedvességi egyenérték” számítására az alábbi (2) egyenletet határozták meg:

$$0,022A + 0,002B + 0,13C + 0,622D + 0,627E = M \pm 3,1 \quad (2)$$

ahol: A: 2–0,25; B: 0,25–0,05; C: 0,05–0,005 és D: 0,005–0 mm-es frakció (%); E: szerves anyag (%); M: „talajnedvességi egyenérték”.

Már Briggs és McLane is felismerték, hogy a számítás pontosítható, ha az adatbázis hasonló tulajdonságokkal rendelkező talajait csoportosítják, illetve a nagyon eltérőeket külön veszik és így minden csoportra más egyenletet írnak fel. A csoportegyenletek becslési hibája az egész adatbázisra felírt általános érvényű egyenlethez képest a harmadára–kétharmadára csökkent. Az adatbázisukban szereplő norfolki és portsmouthi talajokat például az alábbi (3) egyenlettel jellemezték:

$$0,04C + 0,59D + 0,53E = M \pm 1,1 \quad (3)$$

ahol: C: 0,05–0,005 és D: 0,005–0 mm-es frakció (%); E: szerves anyag (%); M: „talajnedvességi egyenérték”.

Hazai kutatók már az 1930-as évektől foglalkoztak a talaj vízgazdálkodását jellemző talajtulajdonságok számított, közelítő meghatározásával. A talaj higroszkóposági értéke és agyagtartalma közötti tapasztalati összefüggést Kotzmann (1938, cit: Mados, 1939) (későbbi nevén Mados) írta le először [(4) és (9) egyenletek], majd Mados (1939), illetve Kreybig (1951) a higroszkóposág, vízkapacitás és holtvíztartalom kapcsolatát vizsgálták [(5), (6), (7), (10) és (11) egyenletek].

Mados (1939) a következő tapasztalati összefüggéseket írta le munkájában, melyben a talaj növényi vízellátásban kitüntetett víztartalmát tanulmányozta:

$$A = 10,02 \text{ hy} + 5,02 \quad (4)$$

$$VK_{\text{term}} = 4 \text{ hy} + 12 \quad (5)$$

$$VK_{\text{lab}} = 5,6 \text{ hy} + 16,5 \quad (6)$$

$$HV_{\text{búza}} = 4 \text{ hy} + 2 \quad (7)$$

ahol: A: agyagtartalom; hy: Kuron-féle higroszkóposág; $HV_{\text{búza}}$: búzára vonatkoztatott holtvíz érték; T_{nedv} : talajnedvesség; VK_{lab} : Vageler szerint laboratóriumi talajmintán meghatározott víztartó képesség; VK_{term} : természetes viszonyok között meghatározott víztartó képesség.

Mados (1939, 1942) a talajok kötöttsége és vízkapacitása közötti összefüggés vizsgálatának előzményeként Alten, Vageler, Kreybig, valamint Briggs és Schantz eredményeit említette.

id. Várallyay (1942) a növények hervadásponthoz tartozó talajnedvességet, a légszáraz talaj nedvességének háromszorosával találta egyezőnek.

Kreybig (1951) a „légszáraz talaj nedvességtartalma” – melyet „hy”-nal jelölt [Kreybig a Kuron-féle higroszkóposági értéket (hy) légszáraz nedvességtartalomnak nevezte] – és a talaj egyes fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságai közötti összefüggéseket [(8)-(11) egyenletek] ismertette:

$$Hy = 2,2 \times hy (\pm 0,4) \quad (8)$$

$$\text{agyagtartalom} = 10 \times hy \quad (9)$$

$$\text{„anyagi vízkapacitás”} = 8 \times h_y \quad (10)$$

$$\text{holtvíztartalom} = 4 \times h_y \quad (11)$$

ahol: „anyagi vízkapacitás”: a minimális vízkapacitásnak felel meg a mai terminológia szerint; *hy:* Kuron-féle higroszkóposság, *Hy:* Mitscherlich-féle higroszkóposság.

Az összefüggések nem szikes és nem duzzadó agyagtalajokra vonatkoznak, részben figyelembe véve a talaj szervesanyag-tartalmát is. Kreybig módosítást javasolt a durvább fizikai féleségű talajok [azon talajok, ahol 10%-nál kevesebb a 0,02 mm-nél kisebb méretű szemcsék részaránya (Stefanovits et al., 1999)] vízgazdálkodási tulajdonságainak számításához, miszerint ezen talajok minimális vízkapacitása a *hy*-érték hatszorosával egyenlő.

Az 1950–1980-as időszakban főként a talajok mechanikai összetételének, térfogattömegének és szervesanyag-tartalmának a víztartó képességre gyakorolt hatását vizsgálták a higroszkópos, a szabadföldi vízkapacitás és a holtvíztartalom nedvességértékeken. A 1950-es évek végén Nielsen és Shaw egyszerű grafikus módszert dolgozott ki a talajok holtvíztartalmának számítására a homok-, iszap- és agyagtartalom alapján (Várallyay et al., 1979). Az 1960-as években egyre többen kezdték el vizsgálni a talaj szemcseeloszlása és víztartó képessége közötti összefüggést és foglalkoztak a víztartóképesség-értékek különböző függvényekkel való leírásával. Közülük kiemelkedő Brooks és Corey (1964), Salter és Williams (1965, 1967), valamint Brutsaert (1966) munkássága. A következő évtizedben a talaj vízmozgásának modellezése, valamint a talajban lejátszódó transzportfolyamatok egzakt fizikai összefüggések megoldására alapozott leírása nagyot fejlődött. Megnőtt az igény a talaj vízgazdálkodási tulajdonságok értékeinek az ismeretére, mivel ezek elengedhetetlen input paraméterei a vízgazdálkodási modelleknek. Az 1980-as években hazánkban Rajkai és munkatársai (1981) dolgoztak ki becslő módszert a *pF*-görbe értékeinek talajtulajdonságokból történő számítására. Vizsgálataik alapján megállapították, hogy a különböző tenziótartományokban ($pF < 1$; $1 < pF < 2,3$; $pF > 2,3$) más-más talajtulajdonság mutat szignifikáns összefüggést a talaj víztartóképesség-értékkel. Az egyre több országban végzett talajvizsgálatok lehetővé tették a talajtulajdonságok közötti összefüggések vizsgálatát, és az általános érvényű pedotranszfer függvények kidolgozását (Hall et al., 1977; Gupta & Larson, 1979; Rawls & Brakensiek, 1985).

Napjainkra a talaj vízgazdálkodási tulajdonságait, ezen belül a talajok víztartó képességét becslő pedotranszfer függvények kidolgozása a talajtani kutatások egyik központi kérdésévé vált az egész világon.

Az utóbbi két évtizedben több olyan talajvízgazdálkodási és -fizikai adatbázist hoztak létre a világon, melyek alkalmasak pedotranszfer függvények kifejlesztésére. Ezek közül a legjelentősebbeket az 2.2. táblázatban mutatom be, kiemelve a mért vízpotenciál értékeket.

A GRIZZLY (Haverkamp et al., 1998, cit: Nemes, 2011) 660 db, az UNSODA v2.0 (Nemes et al., 2001) 790 db több országból gyűjtött talajminta vízgazdálkodási tulajdonságait tartalmazza. Ezek voltak az első nemzetközi adatbázisok (Nemes, 2011).

2.2. táblázat. Fontosabb nemzetközi és hazai talaj vízgazdálkodási és -fizikai adatbázisok jellemzői

Adatbázis neve	Minták eredete	Talajminta szám az adatbázisban	A vizsgált pF-értékek
GRIZZLY Grenoble Catalogue of Soils (Haverkamp et al., 1998, cit: Nemes, 2011)	nemzetközi (főleg Európa és Amerikai Egyesült Államok)	660 db	nehezen hozzáférhető
UNSODA v2.0 Unsaturated Soil Hydraulic Database Version 2.0 (Nemes et al., 2001)	nemzetközi	790 db	országoként más és más, ezért egységesen a Mualem van Genuchten függvények paramétereit határozták meg
WISE version 3.1 "World Inventory of Soil Emission Potentials" (Batjes, 2008)	nemzetközi	47 834 db	pF2; pF2,5; pF4,2
IGBT-DIS Data and Information System of the International Geosphere Biosphere Programme (Tempel et al., 1996)	nemzetközi	131 472 db	pF0; pF1; pF1,5; pF1,8; pF2; pF2,3; pF2,5; pF2,7; pF3; pF3,4; pF4,2
NRCS-NSSC National Soil Survey Characterization database (NSSC) of the U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service (Soil Survey Staff, 1997, cit: Nemes, 2011)	főleg AmerikaiEgyesült Államok	~120 000 db	főként pF2; pF2,5 és pF4,2
HYPRES Hydraulic Properties of European Soils (Wösten et al., 1999)	nemzetközi (Európa)	5521 db	országoként más és más, ezért egységesen a Mualem van Genuchten függvények paramétereit határozták meg
MTA TAKI adatbázisa (Rajkai et al., 1981)	magyar	270 db	pF0; pF0,4; pF1; pF1,5; pF2; pF2,3; pF2,7; pF3,4; pF4,2
HUNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database of Hungary (Nemes, 2002)	magyar	840 db	pF0; pF0,4; pF1; pF1,5; pF2; pF2,3; pF2,7; pF3,4; pF4,2; pF6,2
MARTHA Magyarországi Részletes Talajfizikai és Hidrológiai Adatbázis (Makó, et al. 2010)	magyar	15 005 db	pF0; pF0,4; pF1; pF1,5; pF2; pF2,3; pF2,5; pF3,4; pF4,2; pF6,2

Az NRCS-NSSC (Soil Survey Staff, 1997, cit: Nemes, 2011) körülbelül 120000 talajszint általános, talajfizikai és –kémiai tulajdonságait tartalmazza. Ezen minták közül 9395 db minta rendelkezik mért $pF_{2,5}$ és $pF_{4,2}$ értékhez tartozó víztartó képesség adattal. Az IGBT-DIS és a WISE (Batjes, 2008) mintáinak egy részét az NRCS-NSSC adatai képezik. Az IGBT-DIS adatbázisban 11 különböző pF értékhez tartozó mért víztartó képesség adat található, ezek közül a minták 32%-ára van meg a $pF_{2,5}$, 83%-ára a $pF_{4,2}$ értékhez tartozó víztartó képesség. A WISE adatbázis mintáinak maximum 15%-a rendelkezik mért víztartó képességgel.

A HYPRES (Hydraulic Properties of European Soils) (Wösten et al., 1999) 12 európai ország mért talajfizikai és –hidrológiai adatait – 4030 db talajszelvényre vonatkozóan – foglalja egységes adatbázisba.

Magyarországon eddig két adatbázis volt használható a talaj vízgazdálkodási pedotranszfer függvények kifejlesztésére. Az egyik a Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézetének adatbázisa. Ez 270 db talajmintáról tartalmaz információkat, főleg az Alföldről. Az erre az adatsorra (Rajkai, 1988; Rajkai et al., 1999) kidolgozott becslések a magyarországi csernozjom talajokon alkalmazhatók sikeresen. A másik nagyobb talajfizikai és vízgazdálkodási adatbázis a HUNSODA (Unsaturated Soil Hydraulic Database of Hungary) (Nemes 2002), ami 840 db talajmintát és 576 db talajszint mért víztartó képességét tartalmazza. Mindkét adatbázis nagyon hasznos, egyetlen hátrányuk, hogy a művelhető talajok csak egy szűk csoportjáról szolgáltatnak információt.

A T048302-es számú Országos Tudományos Kutatási Alapprogram (OTKA) segítségével – együttműködve a Magyar Növény- és Talajvédelmi Szolgálat megyei hivatalaival és a MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézetével – a Pannon Egyetem Georgikon Karának Talajtani és Növénytermesztéstani Tanszékének lehetősége nyílt arra, hogy létrehozzák a Magyarországi Részletes Talajfizikai és Hidrológiai adatbázist (MARTHA).

2.1.1. A becslési eljárásokban figyelembe vett talajtulajdonságok

A legtöbb víztartó képesség becslő módszer – statisztikai szempontból folytonos valószínűségi változókként [a talajtulajdonságok, attól függően, hogy folytonosak, illetve diszkréttek, meghatározzák, hogy milyen becslő módszer alkalmazható] – a következő talajtulajdonságokat használja: a talajok mechanikai összetétele, szerves-anyag-tartalma, térfogattömege (Wösten et al., 2001; Pachepsky et al., 2006). A következőkben a becslő egyenletekben előforduló talajtulajdonságokat előfordulási gyakoriságuk alapján foglalom össze.

A *mechanikai összetétel* ismerete szinte az összes PTF-hez szükséges, mert a szemcsefrakciók fajlagos felülete határozza meg döntő mértékben a talaj vízkötő képességét. A különböző szemcsefrakciók hatása a talaj víztartó képességére pF -értékenként más és más. Általánosságban elmondható, hogy a $1,5 \leq pF \leq 2,3$ szakaszban a finom homokfrakció (0,25–0,05 mm) a meghatározó, mert az ezen szemcsefrakciók között kialakuló kapilláris-gravitációs pórusrendszer ebben a tenziótartományban ürül le. A magasabb tenziótartományban ($pF > 2,3$) a szorpciós erők hatása a döntő, így nagy adszorptív felülete miatt az agyagfrakció a meghatározó (Rajkai et al., 1981; Várallyay, 2002b), aminek pozitív hatása van a talaj víztartó képességére. A mechanikai összetételt sokféleképpen alkalmazhatják a becslésekben. Egyes szerzők (Pachepsky et al., 1982; Rajkai et al., 1981; Wösten et al., 1999) a szemcsefrakció kategóriákat veszik alapul. [A szemcsefrakció határok

országoként igen eltérőek (Nemes et al., 1999).] Vannak, akik bizonyos frakciók átmérőjének geometriai átlaga alapján (Scheinost et al., 1997; Minasny et al., 1999), vagy a talaj homok-, por- és agyagfrakciójának, illetve ezek egymáshoz viszonyított arányának (például homok- és iszapfrakció aránya) figyelembe vételével számolnak (Rajkai & Várallyay, 1992; Wösten et al., 1999).

A talaj *szervesanyag-tartalmát* is nagyon sok szerző bevonja a becslésbe (Rawls et al., 1982, 1983, 2006, 2004; Rajkai, 1988; Wösten et al., 1999), főként annak térfogattömegre gyakorolt hatása miatt. A talaj szervesanyag-tartalma meghatározza a szerveskolloid-felület nagyságát (Rajkai, 1988) és hatással van a talaj szerkezetére és adszorpciós tulajdonságaira is (Rawls et al., 2003), így közvetlenül és közvetve is meghatározza a talaj víztartó képességét. Rawls és munkatársai (2003) megállapították, hogy a szerves anyag mennyiségbeli változásának a talaj víztartó képességére gyakorolt hatása egyrészt a talaj szemcseösszetételétől, másrészt a talaj szervesanyag-tartalmának nagyságától függ. A durva fizikai féleségű talajok víztartó képessége érzékenyebb a szerves anyag mennyiségének változására, mint a finomabb szemcséjű talajoké. Továbbá kis szerves-anyag-tartalom esetén, a talaj szervesanyag-tartalmának bizonyos szintig tartó növekedésével a durvább fizikai féleségű talajok víztartó képessége nő. Nagyobb szervesanyag-tartalomnál, a talaj szerves anyag tartalmának növekedése, a talaj fizikai féleségétől függetlenül, nagyobb víztartó képességet eredményez (Rawls et al., 2003).

A *térfogattömeget* több szerző is fontosnak találta (Rajkai et al., 1981; Rawls et al., 1982; Wösten et al., 1999; Bruand et al., 2003) és vette figyelembe a PTF kidolgozásában. A térfogattömeg jellemzi a mikro- és makroaggregátumok, valamint a nagyobb szerkezeti elemek illeszkedésének szorosságát, tehát a gravitációs pórusok mennyiségéről ad tájékoztatást. Alacsony tenziótartományban ($pF \leq 1$) ezért főként ezen talajtulajdonságok határozzák meg, hogy mennyi vizet tárol a talaj (Rajkai et al., 1981; Várallyay, 2002b).

A fent említett talajtulajdonságokon kívül *egyéb talajtulajdonságokat* is be lehet vonni a talaj víztartó képességének becslésébe, ezeket a teljesség igénye nélkül, a szakirodalomban fellelhető munkák alapján a következőkben mutatom be.

Mért víztartóképesség-értékek becslésbe vonásával a becselő modellek átlagos hibája és becslési hatékonysága szignifikánsan javult (Rawls et al., 1982; Ahuja et al., 1985; Rajkai, 2004). Legtöbbször a -33 kPa és -1500 kPa potenciálértékeken mért értékeket használják, mert az adatbázisokban általában ezen nedvességértékek állnak rendelkezésre (Rajkai & Várallyay, 1992).

Egyéb fizikai tulajdonságok, melyek a talaj pórusterének nagyságát befolyásolják, így figyelembe vehetők (Wösten et al., 2001):

- a talajellenállás;
- az agronómiai szerkezet, vagyis az aggregátumok méret szerinti megoszlása (Makó és Elek, 2005; Stefanovits et al., 1999);
- a szerkezet stabilitás, ami arról ad információt, hogy a kolloidok mekkora része van stabil kötésben (Stefanovits et al., 1999).

E talajtulajdonságoknak az alacsonyabb tenziótartományban van jelentőségük, ahol a kapilláris és a gravitációs potenciál befolyásolja a talaj víztartó képességét (Várallyay, 2002b).

Bizonyos *kémiai tulajdonságok* figyelembe vétele szintén fontos lehet, például a szikes talajok esetében, amint erre Rajkai (1988) is rámutatott. Munkájában a szikesedés pH-értékekre gyakorolt hatását a talaj só-, oldható- és kicserélhető Na-ion tartalmával és karbonáttartalmával jellemezte. A CaCO_3 -tartalom víztartó képességre gyakorolt szerepére Rajkai és Várallyay (1992) hívta fel a figyelmet. Az említett kémiai tulajdonságokon kívül cementáló hatásuk miatt figyelembe vehetik még a talajban található vas-oxidok és vas-hidroxidok mennyiségét, vagy a talaj kationkicserélő képességét (Wösten et al., 2001). A kis szervesanyag-tartalmú talajok esetén a kationkicserélő képesség alapján következtetni lehet az agyagásvány-összetételre (Pachepsky & Rawls, 2004).

Vannak olyan eljárások is, amelyek kategóriaváltozókat (diszkrét változókat), például a *fizikai féleséget* (Batjes, 1996; Schaap et al., 2001; Bruand et al., 2003; Makó et al., 2005; Tóth et al., 2005), a *talaj altípust* (Tóth et al., 2005; Makó & Tóth, 2007), a *talaj taxonómiai osztályát* (Batjes, 1996; Rawls et al., 2003), a talajban található *uralkodó agyagásvány-összetételt* (Wösten et al. 2001) veszik figyelembe. Más módszerek pedig kvalitatív tulajdonságokat vesznek be a becslésbe, például a *talaj morfológiát*. Pachepsky és munkatársai (2006) a talaj szerkezetét, Walczak és munkatársai (2006) a talaj porozitását, Lin és munkatársai (1999) a makropórusok méretét, típusát és előfordulásuk gyakoriságát, a gyökerek méretét, előfordulási gyakoriságát és a talaj szerkezetét használták fel a talaj víztartóképeség-becslésben. McKenzie és MacLeod (1989) a *talaj színét* vette figyelembe egyéb talajtulajdonságok mellett a szabadföldi vízkapacitás becslésében. Néhányan (Bastet, 1999; Jamagne et al., 1977 cit: Pachepsky & Rawls 2004) a *talajképző kőzet* alapján csoportosítják a talajokat, azon feltevés alapján, hogy a talajképző kőzet határozza meg elsődlegesen a talaj agyagásvány-összetételét.

A *domborzatot jellemző tulajdonságok* vizsgálata is gyakran fellelhető (Pachepsky et al., 2001; Sharma et al., 2006; Santra & Das, 2008) a PTF-kidolgozás gyakorlatában. Romano és Palladino (2002) például a lejtő alakját találták fontosnak a víztartó képesség becslésében.

Minasny et al. (2008) a közepes infravörös diffúz reflektancia spektroszkóppal (MIR) mért értékek alapján becsülték a talaj víztartó képességét -1, -10, -300 és -1500 kPa mátrixpotenciálon.

A fent említett fizikai és kémiai talajtulajdonságokon kívül az irodalomban fellelhetők olyan módszerek is, amelyek például a *talaj párologtatása* alapján következtetnek a víztartó képességre (Iden & Durner, 2008), vagy olyanok, amik a *vegetációs indexet* (NDVI, ami egy adott terület vegetációs aktivitását fejezi ki) (Sharma et al., 2006) veszik figyelembe.

2.1.2. A talaj víztartó képességét becslő módszerek rendszerezése

Mára nagyon sok víztartóképeség-becslő módszert dolgoztak ki és használnak a talajtanban. Érdemes ezért azokat rendszerezve áttekinteni, ahogy azt a külföldi szakirodalmakban – különböző szempontok szerint – már többen megtették (Cornelis et al., 2001; Wösten et al., 2001; McBratney et al., 2002; Nemes et al., 2003; Pachepsky & Rawls, 2004). A becslő módszerek áttekintéséhez az említett szakirodalmakra is támaszkodtam. A szerzők egyetértenek abban, hogy a becslő módszerek alapvetően két típusba sorolhatók. A fizikai modell alapú becslések csoportjába és az empirikus módszerek közé. Ez utóbbiba tartozik a pedotranszfer függvények többsége.

A *fizikai modell alapú becslések (semiphysical approach/physical model method/mechanistic model)* abból a tényből indulnak ki, hogy a talajok szemcse- és pórusméret eloszlása között összefüggés van (Arya & Paris, 1981). Brooks és Corey (1964) megállapították, hogy a talaj pF-görbéje és szemcseeloszlás-görbéje hasonló lefutású. A szemcseeloszlást és a pF-görbét leíró függvény átlagos meredekségét jellemző paramétere között szignifikáns pozitív korreláció van (Rajkai, 1988). Ezen a fizikailag is igazolható hasonlóságon alapszik a talajok pF-görbéjének a mechanikai összetételből történő számíthatósága (Rajkai, 1988). A talaj víztartó képességét leíró görbékhez a fizikai folyamatok leírásával jutnak el (Rajkai, 2004). A talajok szemcse-eloszlásából számítják a pórusméret-eloszlást, a pórusméret-eloszlásból becslik a nedvességtartalmat (Tietje & Tapkenhinrichs, 1993). Ezt az eljárást alkalmazták a munkájukban például Haverkamp és Parlange (1986), Tyler és Wheatcraft (1989), valamint Comegna és munkatársai (1998).

A másik nagy csoportba tartoznak az *empirikus módszerek*, melyek nem a fizikai elméletek sorából levezetett és egymásra épülő összefüggéseken alapulnak, hanem a becsléshez használt bemenő és kimenő paraméterek közötti összefüggéseket írják fel (Rossiter, 2003).

2.1.2.1. Pedotranszfer függvények

Wösten és munkatársai (2001) a pedotranszfer függvények három típusát különíti el:

1. Az adatokat valamilyen talajtulajdonságok alapján csoportosítják, majd kiszámítják a csoportok átlagos talajvízgazdálkodási tulajdonságait. A becslés szabályok alapján történik (pl: Batjes, 1996; Lilly et al., 2008).
2. Az adatok csoportosítása után a csoportokra külön pedotranszfer függvényeket dolgoznak ki (pl: többek között Pachepsky & Rawls (2004)).
3. A pedotranszfer függvényeket az adatok előzetes csoportosítása nélkül dolgozzák ki. Ezt a becslés típust nevezik *folytonos pedotranszfer függvénynek (continuous pedotransfer functions)*. Többek között például Vereecken és munkatársai (1989) dolgoztak ki ilyen típusú becslést. A folytonos PTF-ekben a magyarázó változó legtöbbször folytonosak.

A talajcsoportok kialakítása többféleképpen történhet. A módszerek többségében a fizikai féleség adja az osztályozás alapját (Rawls et al., 1982; Bruand et al., 2003; Tóth et al., 2005; Pachepsky et al., 2006; Baker, 2008). Csoportképző lehet még a talaj szervesanyag-tartalma (Rawls et al., 2003), szerkezete (Pachepsky & Rawls, 2003), a talaj altípusa (Tóth et al., 2005; Makó & Tóth, 2007), vagy taxonómiai kategóriája (Batjes, 1996; Rawls et al., 2001), a feltalaj és az altalaj (Wösten et al., 1990; Rawls et al., 2001), vagy a talajképző kőzet (Pachepsky & Rawls, 2004). Természetesen a felsorolt lehetőségek kombinációja alapján is történhet a talajok osztályozása, többszintű talajcsoportok kialakításával (pl. Rawls et al., 2003).

A *csoportbecslő pedotranszfer függvények (class pedotransfer functions)*, fogalmat Wösten és munkatársai (1990) vezették be. Ezen PTF-ek kidolgozásakor csoportokat hoznak létre pl. fizikai féleség alapján. A pedotranszfer függvényben a csoportra jellemző átlagos talajtulajdonságok értéke szerepel.

Abban az esetben, ha csak kategóriaváltozók (diszkrét változók) állnak rendelkezésre a becsléshez, inkább beszélünk pedotranszfer szabályok megalkotásáról, mint pedotranszfer függvényről. Ebben az esetben a becslés eredménye általában egy kategóriaérték.

Ha folytonos és kategória típusú talajtulajdonságok alapján történik a becslés, akkor a becslési eljárás módjától függ, hogy mely típusba sorolható a módszer. Például Lilly és munkatársai (2008) munkájában regressziós fákkal végezték a becslést, így az a Wösten és munkatársai (2001) rendszerezésében az első csoportba sorolható.

2.1.2.2. Pedotranszfer szabályok

A *pedotranszfer szabály* (*pedotransfer rule, PTR*) kifejezés először Batjes (1996) munkájában jelenik meg, ami tulajdonképpen a csoportbecslő pedotranszfer függvények (Wösten et al., 1990) egy fajtája. Batjes (1996) a talajok hasznosítható vízkészletét (diszponibilis vízkészletét, DV) becsülte a FAO–UNESCO által készített világ talajai atlaszán feltüntetett talajegységek (talajtípusok), fizikai féleség és szerves anyag kategóriák alapján. Először minden talajegységre számolt egy átlagos DV-t, majd azt rendelte a szabályoknak megfelelő tulajdonságokkal rendelkező azon talajmintákhoz is, amiknél nem álltak rendelkezésre mért víztartóképeség-adatok. Később ezt a szabályalkotó módszert *talajosztályozás alapú szabálynak* (*taxotransfer rule*) nevezték, mivel a szabályalkotás rendszertani egységenként különbözik. Nagy adatbázisok statisztikai eredményei alapján rendelik a szabályok alapján besorolt talajhoz a hiányzó tulajdonságokat (Batjes et al., 1997). E módszer kidolgozásának a feltétele tehát a kellően nagy adatbázis, hiszen minden talajegységnek reprezentatív mintaszámmal kell rendelkeznie (Batjes et al., 2007).

Pedotranszfer szabályokat több szerző is alkalmazott, például Quisenberry és munkatársai (1993), Daroussin és King (1996), Lilly és munkatársai (1996), valamint Makó és munkatársai (2005). A pedotranszfer szabályokkal a kvalitatív talajtulajdonságok minőség fokozatuk alapján ordinális skálára konvertálhatók, így lehetővé téve e tulajdonságok használatát a statisztikai elemzésekben (Lilly et al., 1996). A talaj víztartó képességének *PTR*-ekkel történő becslését leginkább kontinentális vagy globális méretű alkalmazásokban használják. Ezeken a léptékeken ugyanis az adatbázisok kategória típusú adatokat tartalmaznak, így a becsült tulajdonságok kvalitatív jellegűek (Daroussin & King, 1996; Batjes, 1996). Megoldást jelentenek azonban azokban az esetekben is, amikor csak kategória típusú (ordinális vagy nominális) információk állnak rendelkezésre a becsléshez (Lilly, et al., 2008).

2.1.2.3. A becslés típusai

A becselő módszerek vagy a pF-görbe jellemző pontjaihoz tartozó víztartó képességet, vagy a pF-görbét leíró függvény paramétereit számítják.

Azon PTF-ek esetén, amelyek a talaj víztartó képességet meghatározott mátrixpotenciálokon becslik (a pF-görbe mért pontjain) *pontbecslésről* (*point estimation methods*) beszélünk. Ezt a módszert alkalmazták többek között Gupta és Larson (1979); Rajkai és munkatársai (1981); Rawls és Brakensiek (1982); Rawls és munkatársai (1982); Ahuja és munkatársai (1985); Rajkai (1988); továbbá Tomasella és munkatársai (2003).

Görbebecslésnek (*parametric estimation methods*) nevezik azt az eljárást, amikor a víztartóképeség-görbét leíró függvény paraméterértékeit számítják egyéb talajtulajdonság

értékekből. A függvényparaméterek alkalmazása a pF-görbe 10 mért értékét becslő tíz PTF helyett 3–5 függvényparamétert becslő PTF-el helyettesíthető (Rajkai, 1988). Így például:

– többek között Rawls és Brakensiek (1985) valamint Mayr és Jarvis (1999) a Brooks és Corey (1964) függvény (12) paramétereit becsülte:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot (h_A/h)^\lambda \quad (12)$$

ahol: θ : a talaj nedvességtartalma (tf % vagy $\text{m}^3 \times \text{m}^{-3}$); h : a talaj nedvességpotenciálja (cm); θ_r , θ_s , h_A , λ : illesztési paraméterek.

– Vereecken és munkatársai (1989), Scheinost és munkatársai (1997), Schaap és munkatársai (1999), Wösten és munkatársai (1999), Rajkai (2004), valamint Børgesen és Schaap (2005) a van Genuchten (1980) pF-függvényének paramétereit (13) számították:

$$\theta(h) = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha h)^n)^m) \quad (13)$$

ahol: θ : a talaj nedvességtartalma (tf % vagy $\text{m}^3 \times \text{m}^{-3}$); h : a talaj nedvességpotenciálja (cm); θ_r , θ_s , α , n , m : illesztési paraméterek.

– Rajkai (2004), valamint Tóth és munkatársai (2005) az alapvető talajtulajdonságok és a Brutsauert (1966) függvény (14) paramétereit közötti összefüggéseket vizsgálták:

$$\theta = \theta_s / (1 + (\alpha h)^n) \quad (14)$$

ahol: θ : a talaj nedvességtartalma (tf % vagy $\text{m}^3 \times \text{m}^{-3}$); h : a talaj nedvességpotenciálja (cm); θ_s , α , n : illesztési paraméterek.

A van Genuchten-egyenletnek (12) van inflexiós pontja, ezért jobb az alkalmazhatósága, mint a Brooks és Corey modellnek, főként a víztelített nedvességpotenciál közelében. Ezt használják ezért a legtöbbször a talaj víztartó képességének a leírására (Cornelis et al., 2001). A Brutsaert-függvény előnye, hogy kisebb hibával illeszkedik a hazai talajokra, mint a van Genuchten-függvény. Hátránya viszont, hogy nem írja le a vízvezetőképesség-függvényt (Rajkai, szóbeli közlés).

A pontbecslést főként akkor alkalmazzák, amikor a talaj teljes vízkapacitásának, szabadföldi vízkapacitásának és holtvíztartalmának ismeretére van szükség. Ha azonban a talaj víztartó képességét leíró pF-görbe meghatározása a cél, amire például a transzport modellekben van szükség, akkor többnyire görbebecslést alkalmaznak. Pontbecslés során a középső tenziótartományban ($2 < pF \leq 2,7$) a legnagyobb a becslés hibája, mert ott a talajok nedvességtartalma különböző hatások eredőjeként alakul (Rajkai, 1988).

2.1.2.4. A becslésekben használt statisztikai módszerek

A talaj víztartó képességének a becslését legtöbbször *regressziós függvényekkel* végzik, amelyek lehetnek *többváltozós lineáris vagy nem-lineáris függvények*.

A *többváltozós lineáris regresszió (multiple linear regression)* az egyváltozós lineáris regresszió kiterjesztése, amikor is több független változó és egy függő változó közötti kapcsolatról van szó. A pontbecslő PTF-ekben használják leginkább ezt a technikát, de például a van Genuchten-függvény ((13) egyenlet) paramétereit is több szerző ezzel a módszerrel becsülte (Vereecken et al., 1989; Scheinost et al., 1997; Minasny et al., 1999; Wösten et al., 1999; Rajkai et al., 2004).

Általában a következő ((15) egyenlet) egyenlettípussal jellemzik az adott mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességet (Wösten et al., 2001):

$$\theta_h = a \text{ homok} + b \text{ iszap} + c \text{ agyag} + d \text{ szerves anyag} + e \text{ térfogattömeg} + \dots + x \text{ X változó} \quad (15)$$

ahol: θ_h : a talaj nedvességtartalma meghatározott h nedvességpotenciálon; a, b, c, d, e, x regressziós koefficiensek; az X változó pedig a könnyen mérhető talajtulajdonságok egyike.

Rajkai (1988) a víztartó képesség és bizonyos talajtulajdonságok kapcsolatát négyzetes tagot is tartalmazó regressziós egyenlettel ((16) egyenlet) írta le, így csökkentve a becslés hibáját:

$$pFx = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 \quad (16)$$

ahol: b_0 – b_5 : a regressziós együtthatók, x_1 : az első helyen korrelatív független változó, x_2 : a második helyen korrelatív független változó, x_1 és x_2 : pF -görbe ponttól függően lehet a talaj valamely szemcsefrakciója, térfogattömege vagy szervesanyag-tartalma.

A *nem-lineáris regressziós egyenlet (extended non-linear regression)* független változók csoportja és egy függő változó közötti nemlineáris kapcsolatok feltárására szolgál. Ezt az eljárást alkalmazták, például Scheinost és munkatársai (1997), valamint Rajkai és munkatársai (2004).

Az 1990-es években új adatbányászati technikákat kezdtek alkalmazni a becslések kidolgozására, úgy, mint a mesterséges neurális hálózat, a csoportos adatkezelés módszere, vagy a klasszifikáció és regressziós fa alkalmazása. A továbbiakban röviden bemutatom ezeket a módszereket és a 2.3. táblázatban összefoglalom alkalmazásuk előnyeit és hátrányait.

A *mesterséges neurális hálózatok (artificial neural network (ANN))* módszere adott minták alapján akkor is elkészíti a bemenő és kimenő adatok közötti kapcsolatok modelljét, ha ez képlettel nem írható le, vagy a megoldáshoz szükséges szabályok ismeretlenek. Ahhoz, hogy a bemenő adatok és a kimenő értékek közötti kapcsolatot feltárjuk, a hálózatot először „tanítani” kell. A tanítás során az ismert bemenő adatokból a hálózat működési eredményét ismert adatokhoz hasonlítják, és ha a mennyiségek eltérnek, úgy igazítják a hálózat működését, hogy az illeszkedés hibája a lehető legkisebb legyen. A neurális hálózatok használata igen alkalmas sok összefüggő bemenő adat és összefüggő kimeneti paraméter esetén, ha az adathalmaz nem teljes, vagy hibás és/vagy, ha a megoldáshoz szükséges szabályok ismeretlenek (Sárközy, 1998; Nemes et al., 2003; Børgesen & Schaap, 2005). Pedotranszfer függvények előállítására sokan alkalmazták már ezt a módszert (Pachepsky et al., 1996; Schaap & Leij, 1998; Minasny et al., 1999; Schaap et al., 1999; Nemes et al., 2003; Baker & Ellison, 2008).

2.3. táblázat. Újabb adatbányászati eljárások összevetése a hagyományos regressziós módszerekkel*.

Előnyök	Hátrányok
<i>Mesterséges neurális hálózat</i>	
– nem kíván előzetes ismeretet a bemenő és kimenő változók kapcsolatáról; – kategóriaváltozókat is tud kezelni; – a változók közötti kapcsolat leírása bármilyen egyenlettel lehetséges; – robusztus.	– a becsléshez szükséges bemenő paramétereket előzetesen kell kiválasztani; – a bemenő és kimenő változók közötti kapcsolatokat legtöbbször nem lehet értelmezni, mert a modell bonyolult egyenletekkel írja le azokat (black-box model); – az iterációk száma nehezen optimalizálható.
<i>Csoportos adatkezelés módszere</i>	
– nagyszámú paraméterből kiválasztja a szignifikáns független változókat; – megadja a bemeneti és kimenő paraméterek közötti egyenletek rendszerét.	– kategóriaváltozókat nem tud kezelni; – az iterációk száma nehezen optimalizálható.
<i>Klasszifikációs fa (regressziós fa)</i>	
– az eredmények kiértékelése könnyebb; – kategóriaváltozókat is kezel; – nem normális eloszlású adatokra is alkalmazható.	– nehéz meghatározni a hierarchia szintek és a bennük szereplő osztályok optimális számát.

Megjegyzés: * Giménez et al. (2001), Nemes et al. (2003), Pachepsky & Rawls (2004), és Pachepsky et al. (2006) alapján.

A csoportos adatkezelés módszere (*group method of data handling (GMDH)*) olyan módszer, amely több bemenő és egy kimenő változó közötti kapcsolatot tárja fel. A regressziós vizsgálat és a mesterséges neurális hálózatok előnyeit ötvözi. Egy flexibilis neurális hálózat típusú összefüggéssel jellemzi a bemenő és kimenő adatok közötti kapcsolatot, miközben csak a becsléshez fontos bemenő változókat tartja meg (Giménez et al., 2001). Használata előnyös, ha sok a független változó a becslésben (Pachepsky & Rawls, 2004).

A klasszifikációs fa (*regressziós fa*) (*classification tree, regression tree, CART*) használatakor először a sokaság elemeit az elemek tulajdonságai szerint két vagy több csoportba osztályozzák. Ezután a regressziós fa módszer az adatokat homogén alcsoportokra osztja. Ez a módszer mind a függő, mind a független változót tekintve alkalmas folytonos és kategória adatok kezelésére is (Rawls et al., 2003; Pachepsky et al., 2006; Lilly et al., 2008; Nemes, 2010). Lilly és munkatársai (2008) ezen módszer segítségével azt is vizsgálni tudták, hogy mennyiben változik a becslés pontossága, attól függően, hogy kvantitativ vagy kvalitatív tulajdonságokat vonnak be a hidraulikus vezetőképesség becsléséhez.

A víztartó képesség becslésének kidolgozásához alkalmazott legújabb módszerek a „support vector machines” (SVM) (Lamorski et al., 2008; Twarakavi et al., 2009), k-legközelebbi szomszéd algoritmus (k-nearest neighbor (k-NN)) (Nemes, 2006; 2008) és a fuzzy k-közép algoritmus (Tranter et al. 2010).

2.1.3. A pedotranszfer függvények alkalmazása és megbízhatóságának vizsgálata

Általánosságban elmondható, hogy azon függvényekkel a leghatékonyabb a becslés, amelyeket a vizsgálandó terület talajaihoz hasonló tulajdonságú talajadatbázison dolgoztak ki (Schaap & Leij, 1998). Minél specifikusabbak a PTF-függvények, annál pontosabb becslést adnak, de csupán kisebb területre, vagy meghatározott talajféleségre.

Annak eldöntésében, hogy a vizsgálandó adatbázisban és az alkalmazni kívánt PTF kalibrációs adatbázisában szereplő talajok tulajdonságai hasonlóknak tekinthetők-e, a különböző statisztikai távolságszámítások segítenek (Nemes et al., 2006, Tranter et al., 2009). A megfelelő PTF kiválasztásához Tranter és munkatársai (2009) a következő eljárást javasolják:

- a) a PTF kalibrációs adatbázisának független változóira adjuk meg az átlagértékek és a szórások értékeit és vizsgáljuk meg a variancia–kovariancia mátrixukat;
- b) határozzuk meg a kalibrációs adatbázis kiugró adatait és számítsuk ki a kiugró adatok távolságát az adatbázis számtani átlagától;
- c) számítsuk ki a Mahalanobis távolságot a PTF kalibrációs adatbázisának számtani átlaga és a vizsgálandó talajminták között;
- d) amennyiben $c > b$, ne használjuk a pedotranszfer függvényt.

A PTF-ek becslési hatékonyságát és adatigényét több szerző is (Rajkai & Kabos, 1999; Cornelis et al., 2001; Wösten et al., 2001; Børgesen & Schaap, 2005; Al Majou et al., 2008) összehasonlította különböző adatbázisokon. Egyöntetű megállapításuk, hogy a becslőeljárások pontosságának alapja a kalibrációs adatbázis és becslő adatbázis tulajdonságainak hasonlósága. Minél specifikusabbak a pedotranszfer függvények, annál pontosabb becslést eredményeznek kisebb, homogénebb talajcsoportra. Ez a magyarországi becslési eljárások esetében is igaz, pl. a szikesek víztartó képességét becslő függvények érvényességét tekintve (Rajkai, 1988). Országos léptékű hidrológiai számításokhoz viszont a nagyobb, heterogénebb talajmintákat tartalmazó adatbázison kidolgozott PTF-ek használhatóbbak (Tóth et al., 2005), amint azt hazai viszonyokra Makó és munkatársai (2010, 2011) a Magyarországi Részletes Talafizikai és Hidrológiai Adatbázisra (MARTHA) vonatkozó munkája mutatja. A MARTHA adatbázis a különböző hazai nem szikes és szikes talajokra specifikus PTF-függvények kidolgozására is lehetőséget nyújt (Tóth et al., 2006; Makó & Tóth, 2007; Makó et al., 2010, 2011). Országos léptékű becslések kidolgozásához azonban a kontinentális léptékű adatbázis használata nem javasolt, mert az nagyobb becslési hibát eredményezhet (Nemes et al., 2003; Makó et al., 2010, 2011).

Amennyiben nem lelhető fel a szakirodalomban olyan talaj víztartó képességet számító PTF vagy PTR, ami alkalmazható lenne a saját adatainkra (például: nem áll rendelkezésre a modellhez szükséges bemenő paraméterek egyike – vagy annak becslése nem lehetséges, ill. nem célravezető) akkor merülhet fel egy létező PTF/PTR módosítása a hozzáférhető adatokra (Makó et al., 2010, 2011), vagy egy új PTF/PTR kidolgozása. A 2.4. táblázat néhány gyakran használt PTF adatigényét tartalmazza.

2.4. táblázat. Néhány talajvíztartó-képességet becslő pedotranszfer függvény adatigénye.

Becslés típusa	Szerzők	Bemenő paraméterek	Becsült talajtulajdonságok
Többváltozós lineáris regresszió	Gupta & Larson (1979)	0,002–0; 0,05–0,002; 2–0,05 mm-es szemcsefrakciók; szerves anyag; térfogattömeg	pF ₂ ; pF _{2,5} ; pF ₃ ; pF _{4,2}
Pontbecslés	Rajkai et al. (1981)	0,002–0; 0,005–0,002; 0,01–0,005; 0,02–0,01; 0,05–0,02 mm-es szemcsefrakciók; térfogattömeg	pF ₀ ; pF _{0,4} ; pF ₁ ; pF _{1,5} ; pF ₂ ; pF _{2,3} ; pF _{2,7} ; pF _{3,4} ; pF _{4,2} ; pF _{6,2}
Többváltozós lineáris regresszió	Vereecken et al. (1989)	0,002–0; 0,01–0,002; 0,02–0,01; 0,05–0,02; 0,1–0,05; 0,2–0,1; 0,5–0,2; 1–0,5; 2–1 mm-es szemcsefrakciók; szerves szén; térfogattömeg	van Genuchten-függvény négy paramétere: θ_s , θ_r , α , n
Görbebecslés	Scheinost et al. (1997)	0,002–0; 0,063–0,002; 2–0,063; 63–2 mm-es szemcsefrakciók; szerves szén; térfogattömeg	
Mesterséges neurális hálózat	Schaap & Leij (1998)	0,002–0; 0,05–0,002; 2–0,05 mm-es szemcsefrakciók; térfogattömeg	
Görbebecslés	Tomasella et al. (2000)	0,002–0; 0,05–0,002; 0,2–0,05, 2–0,2 mm-es szemcsefrakciók; szerves szén; „talajnedvességi egyenérték”; térfogattömeg	
Regressziós fa és csoportos adatkezelés módszere	Rawls et al. (2003)	fizikai féleség, szerves szén, talajtípus	pF _{2,5} ; pF _{4,2}
Többváltozós lineáris és nem-lineáris regresszió	Rajkai et al. (2004)	0,002–0; 0,05–0,002; 2–0,05 mm-es szemcsefrakciók; szerves anyag; térfogattömeg; szabadföldi vízkapacitás	van Genuchten-függvény három paramétere: θ_s , α , n
Görbebecslés			

Megjegyzés: *A Tomasella és munkatársai (2000) által használt „talajnedvességi egyenérték” fogalom (moisture equivalent) azt a nedvességtartalmat jelenti, ami 2400 fordulat/perc-es 30 percig tartó centrifugázás után marad a talajban. Nem egyezik meg a Briggs és McLane (1907) által használt „talajnedvességi egyenérték” fogalommal

McBratney és munkatársai (2002) felhívja a figyelmet, hogy az új becslő modellek kidolgozásánál szükséges a kiugró adatok kalibrációs adatbázisból történő kiszűrése.

A kidolgozott becslő modellek *pontosságát* (*accuracy*) a becslő (kalibrációs) adatbázison, *megbízhatóságukat* (*reliability*) a becslő adatbázistól független teszt adatbázison kell ellenőrizni (Wösten et al., 2001). A modellek e tulajdonságait legtöbbször az átlagos hiba (ME) ((17) egyenlet) és az átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke (RMSE), más néven empirikus szórás ((18) egyenlet) adja meg.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i) \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (18)$$

ahol: y_i : a mért érték; $\hat{y}_i$: az y becsült érték; N : mintaelemszám.

Néhány modell becslési pontosságát (*accuracy of estimation*) Wösten és munkatársai (2001) táblázatba foglalva mutatja be.

A PTF/PTR-ek fejlesztésében a pontosság és a megbízhatóság (*reliability of estimation*) vizsgálatára többek között a következő statisztikai elemzéseket használják (Wösten et al., 2001): korrelációs koefficiens, determinációs együttható, F-próba; átlagos abszolút hiba, relatív hiba vagy t-próba.

A görbebecslés hibaszámítását Rajkai (2004) a pF-görbére vonatkozó átlagos hiba meghatározásával végezte, a következő egyenlettel:

$$ZAPF = \frac{\sum_{i=1}^n |\Theta_e - \Theta_m|}{n} \quad (19)$$

ahol: n : a víztartókéesség-függvényt meghatározó illesztési pontok száma; Θ_e : a becsült nedvességtartalom (%); Θ_m : a mért nedvességtartalom (%).

Rajkai (2004) jónak tekintette azt a víztartókéesség-becslést, amikor $|ZAPF| < 2,5$. A ZAPF ezen értéke a víztartó kéesség mérésel történő meghatározásának átlagos hibájával megegyező.

Amennyiben több víztartókéesség-becslő modell is a rendelkezésünkre áll, a kiválasztásnál a becslés hibájának figyelembe vétele mellett, a becsléshez szükséges paraméterszámra is figyelemmel kell lenni. Az F-próba alkalmazásával a kisebb hibájú modellt választhatjuk ki. Több, különböző paraméterszámú modell esetén, a modellek hatékonyságának megállapítására kidolgozott kritériumok mérlegelésével dönthető el, hogy melyik a legalkalmasabb modell. Rajkai (2004) és Russo (1988, cit: Wösten et al., 2001) a pF-adatokra illesztett egyenlet és a különböző paraméterszámú becslő modellel kapott pF-görbék összehasonlítására az Akaike-féle információs kritériumot (AIC) ((20) egyenlet) használta:

$$AIC = N \cdot \ln\left(\frac{SSQ}{N}\right) + 2 \cdot P \quad (20)$$

ahol: N : a mintaelemszám; SSQ : a hibanégyzet összeg; DF_{hiba} : a hiba szabadságfoka; P : a modell paraméterszáma.

Az Akaike kritérium alapján a kisebb AIC értékű a megfelelőbb modell. A modellválasztási kritériumok közül ennek a kritériumnak a használata a legelterjedtebb.

A pF-becslő eljárás jellemzésére használjuk a *becslési hatékonyság* mutatót, amely a vizsgált adatbázisra százalékosan fejezi ki az elfogadható hibájú becslések számát. Rajkai (2004) például a 2,5%-nál kisebb átlagos hibájú (AME) becsléseket tekintette jónak.

2.2. Talajfizikai tulajdonságok becslésére szolgáló szoftverek

A becslő módszerek közül sokat számítógépes algoritmusba is beépítettek, megkönnyítve ezzel a pedotranszfer függvények gyakorlati alkalmazását. Ilyen program például a *k*-Nearest (Nemes et al., 2008), a TALAJTANonc 1.0 (Fodor & Rajkai, 2005), a Neuro Multistep (Minasny et al., 2004), a SOILPAR 2.0 (Acutis & Donatelli, 2003), a MUUF (Map Unit User File) (Rawls et al., 2001), a ROSETTA (Schaap et al., 2001), vagy az SH-Pro (Cresswell et al., 2000). Ezek a programok általában több becslő függvényt is tartalmaznak, a felhasználónak kell eldöntenie, hogy számára melyik a legalkalmasabb. A jövőben olyan automatizált döntéstámogató rendszereket (*soil inference systems*) szándékoznak kifejleszteni, amelyek a bevitt adatok és a becsülni kívánt talajtulajdonság alapján kiválasztják a legalkalmasabb – legkisebb hibával becslő – pedotranszfer függvényeket. Ezek a döntéstámogató rendszerek nemcsak talaj vízgazdálkodási, de egyéb talajfizikai és -kémiai tulajdonságok becslésére is használhatók lehetnek (McBratney et al., 2002).

A TALAJTANonc 1.0 hazai fejlesztésű program, amely hazai és külföldi fejlesztésű talajfizikai becslési eljárásokat tartalmaz. A program víztartóképeség-, vízvezetőképesség-függvényt számít, valamint további 11 algoritmust tartalmaz, melyek segítségével a könnyebben mérhető talajtulajdonságokból talajfizikai és vízgazdálkodási jellemzők becsülhetők (Fodor & Rajkai, 2005). Ez a program alkalmas keretet biztosíthat a későbbiekben kidolgozandó PTF-ek számítógépes alkalmazására is.

2.3. Magyar talajokra kidolgozott víztartó képességet becslő módszerek

Hazai talajok víztartó képességének becslésével az elmúlt harminc évben több kutató is foglalkozott, közülük behatóbban Várallyay, Rajkai, Nemes és Makó. Munkájuk sok hasznos eredménnyel szolgál, amit kutatómunkám során igyekeztem felhasználni. A következőkben röviden áttekintem az említett kutatók legfontosabb kapcsolódó munkáit (2.5. táblázat). Eredményeikre és megállapításikra a dolgozatom eredmények fejezetében térek ki.

Rajkai (1988) munkájában szikes talajok víztartó képességének becslési lehetőségeit is vizsgálta. Többszörös lineáris regresszióval kidolgozott pontbecslést alkalmazott, 9 db mátrixpotenciálhoz (-0,1, -0,25, -1, -3, -10, -20, -50, -250 és -1500 kPa) tartozó nedvességtartalom számítására. A vizsgálatot 14 db hortobágyi talajszelvény 50 talajrétegéből vett mintán végezte el. A talajszelvények talajtípusa réti szolonyec és szolonyeces réti talaj.

2.5. táblázat. Magyar talajokra kidolgozott becslő módszerek áttekintő táblázata.

Szerző	A becslés kidolgozásához felhasznált adatbázis	Becsítő módszer	Input paraméterek	Becsült tulajdonságok
Pachepsky, Timlin, Várallyay (1999)	MTA TAKI 50 db talajszelvény 230 db talajmintája	Mesterséges neurális hálózat és nemlineáris regresszió	0-0,002; 0,002-0,005; 0,005-0,01; 0,01-0,02; 0,02-0,05; 0,05-0,25 mm-es szemcsefrakciók; térfogattömeg	a) θ : -0,1, -1, -3, -10, -20, -50, -250 és -1500 kPa mátrixpotenciál b) van Genuchten-függvény három paramétere: θ_r, α, n
Rajkai (2004)	MTA TAKI 50 db talajszelvény 230 db talajmintája	Többváltozós és szemilineáris regresszió	a) 0-0,002; 0,002-0,005; 0,005-0,01; 0,01-0,02; 0,02-0,05; 0,05-2 mm-es szemcsefrakciók; térfogattömeg, szerves anyag tartalom b) a)-ban használt + $\theta_{-1500\text{kPa}}$ c) a)-ban használt + $\theta_{-33\text{kPa}}$	a) θ : -0,1, -0,25, -1, -3, -10, -20, -50, -250 és -1500 kPa mátrixpotenciál b) Brutsaert függvény paraméterei: θ_s, α, n
Rajkai (2004)	Hortobágyi „Nyírólapos” szikes legelő 14 db talajszelvény 50 db talajmintája	Többváltozós lineáris regresszió	0-0,002 mm-es szemcsefrakció; térfogattömeg; összessótartalom; kalcium-karbonát tartalom; kicserélhető Na-tartalom	θ : -0,1, -0,25, -1, -3, -10, -20, -50, -250, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciál
Rajkai et al. (2004)	305 db talajminta (75 db dombos területről, 225 db az Alföldről)	Többváltozós lineáris és nem-lineáris regresszió	0-0,002; 0,002-0,05; 0,05-2 mm-es szemcsefrakciók; szerves anyag; térfogattömeg; szabadföldi vízkapacitás	van Genuchten-függvény három paramétere: θ_s, α, n
Nemes (2003)	HUNSODA 177 db talajszelvényének 576 db talajmintája	A víztartó képesség görbét leíró van Genuchten függvény paramétereire átlag értékek számítása	a) USDA-SDS fizikai féleség osztályok b) FAO fizikai féleség osztályok	van Genuchten-függvény négy paraméterének átlagos értékei fizikai féleség kategóriánként: $\theta_s, \theta_r, \alpha, n$
	HUNSODA 233 db talajmintája	Mesterséges neurális hálózat	a) 0-0,002; 0,002-0,05; 0,05-2 mm-es szemcsefrakciók b) a)-ban használt + térfogattömeg c) b)-ben használt + szerves anyag d) b)-ben használt + $\theta_{-1500\text{kPa}}$ e) b)-ben használt + $\theta_{-33\text{kPa}}$ f) b)-ben használt + $\theta_{-10\text{kPa}}$ g) f)-ben használt + $\theta_{-33\text{kPa}}$ h) f)-ben használt + $\theta_{-1500\text{kPa}}$ i) g)-ben használt + $\theta_{-1500\text{kPa}}$ j) i)-ben használt + szerves anyag	van Genuchten-függvény négy paramétere: $\theta_s, \theta_r, \alpha, n$
Makó et al. (2005)	99 db erdő talaj minta	Hierarchikus klaszteranalízis	fizikai féleség, szerves anyag kategóriák	talajtípus, θ : -0,1, -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciál

$\theta_{-10\text{kPa}}$: -10 kPa mátrixpotenciálán mért nedvességtartalom; $\theta_{-33\text{kPa}}$: -33 kPa mátrixpotenciálán mért nedvességtartalom; $\theta_{-1500\text{kPa}}$: -1500 kPa mátrixpotenciálán mért nedvességtartalom.

Pachepsky, Timlin és Várallyay (1996) mesterséges neurális hálózatokkal becsülték a víztartó képesség görbe nevezetesebb mátrixpotenciál pontjaihoz tartozó nedvességtartalmakat (-0,1, -1,0, -3,2, -10, -20, -50, -250 és -1500 kPa), valamint a van Genuchten függvény paramétereit.

Rajkai et al. (1999) a víztartó képesség görbét leíró van Genuchten függvény paramétereit becsülték. Vizsgálták, hogy mennyiben változik a becslés hatékonysága amennyiben mért víztartó képesség értékeket (a -20, illetve a -1500 kPa-on mért nedvességtartalmat) is használnak input paraméterként a becselő modellben.

Nemes (2003) csoportbecslő és folytonos pedotranszfer függvényeket dolgozott ki a HUNSODA adatbázisban (Nemes, 2003) szereplő talajok alapján. A FAO (FAO, 1995 cit.: Nemes, 2003) és az USDA-SCS (USDA, 1951, cit.: Nemes, 2003) fizikai féleség osztályokra kiszámította az átlagos víztartó képesség értékeket (-0,1, -0,25, -1, -3, -10, -20, -50, -250, -1500 és -150000 kPa) és azokra illesztette a van Genuchten függvényt (van Genuchten, 1980). Ezzel megállapította a különböző fizikai féleségű talajok víztartó képességét leíró átlagos van Genuchten paramétereket, amiket különböző talajtulajdonságok alapján (lásd 2.5. táblázat) is becsült mesterséges neurális hálózatokat alkalmazva.

Makó et al. (2005) 99 db erdő feltalaj mintán vizsgálta és 52 db mintán tesztelte a víztartó képesség becslési lehetőségeit. A becsléseket a nagyméretarányú talajtérképeken szereplő kategória adatokkal végezte, hierarchikus klaszteranalízis módszert alkalmazva. Dolgozatomban ezt a szemléletet tovább vite dolgoztam ki a becselő módszereket. Munkám során nagy hangsúlyt helyeztem a térképi információk alapján történő víztartó képesség számításra.

Látható, hogy hazánk talajaira több elismert kutató dolgozott ki becselő módszereket a talajok víztartó képességének számítására. Arra azonban Rajkai (2004) felhívja a figyelmet, hogy a becselő módszerek kidolgozásához általa használt adatbázis „Magyarország talajait csak korlátozottan reprezentálja”, ezért további kutatás szükséges a becselő módszerek kiterjesztéséhez. Ez a megállapítás a többi módszer kidolgozásánál is igaz, hiszen a HUNSODA adatbázis talajai is főként az Alföld művelhető talajait reprezentálják. Azzal, hogy 2010-re elkészült a Magyarországi Részletes Talajfizikai és Hidrológiai Adatbázis (MARTHA ver2.0), mely a közzétételű, a láptalajok és a mocsári erdők talajai fő típusok kivételével reprezentatív a többi talaj fő típusunkra, és több mátrixpotenciálon mért nedvességtartalom értékeket is tartalmaz, nagyszerű lehetőség adódott arra, hogy Magyarország talajaira általánosabb érvényű víztartó képességet becselő módszereket lehessen kidolgozni.

2.4. A becselő módszerek felhasználása

A pedotranszfer függvények becslési eredményeit legtöbbször modellezésben használják, mint például a talaj vízmozgás modellezése (Fodor & Rajkai, 2004), vagy annak területi jellemzése (Bakacsi et al., 2008). Az említetteken kívül a becsült talajjellemzőknek még nagyon sokféle alkalmazási lehetősége van. Néhány példa a felhasználási lehetőségek közül: a talaj vízforgalmának leírása a növénytermesztési modellekben (Fodor & Kovács, 2001; Fodor et al., 2001), a talajerózió modellezése (Pachepsky & Rawls, 2004), a talajok klímaérzékenységének vizsgálata (Farkas et al., 2009), a szén- és nitrogén körforgalmának modellezése (Li et al., 2007), a földminősítés (Makó et al., 2007), a termésbecslés talajtani

paramétereinek megalapozása Európában (Baruth et al., 2008), vagy a peszticid- és a nitrátkimosódás elemzése (McBratney et al., 2002).

3. Anyag és módszer

A becslő módszerek kidolgozását egy olyan adatbázis alapján végeztem el, amely egyaránt tartalmazza a – talajtérképeken is szereplő – méréssel meghatározott fizikai és kémiai talajjellemzők adatait, valamint a mért talajvízgazdálkodási tulajdonságokat is.

A vizsgálatok elvégzését és a becslő módszerek kidolgozását a Magyarországi Részletes Talajfizikai és Hidrológiai Adatbázis (MARTHA; Makó, et al., 2010) létrejötte tette lehetővé. Vizsgálataimat ezen az adatbázison végeztem.

3.1. *A vizsgálati adatbázis és adatbázis műveletek*

3.1.1. *A vizsgálati adatbázis jellemzői*

A Magyarországi Részletes Talajfizikai és Hidrológiai Adatbázis (MARTHA) kialakításának célja az összes Magyarországon elérhető, közvetlenül vizsgált talajfizikai és vízgazdálkodási adat összegyűjtése, összehangolása és egységes adatbázisba rendezése volt.

A MARTHA adatbázis jól reprezentálja az ország talajait, azokon belül is főként a mezőgazdasági művelés alatt álló talajok adataiban gazdag. Az adatbázist SQL platformú (Firebird 2.0) szerveren tároljuk, a programnyelv Delphi. A talajszelvények elhelyezkedésének megjelenítését a GoogleMap kapcsolat teszi lehetővé, de más térinformatikai szoftverekkel is megjeleníthető az adatok térbeli elhelyezkedése. A MARTHA legutóbbi verziója a 2.0.

A MARTHA ver2.0 tartalmazza a már korábban létrehozott kisebb adatállományokat: a már említett HUNSODA-át (Nemes, 2003), az MTA TAKI adatbázisát (Várallyay, 1987; Rajkai et al., 1981) és a Talajvédelmi Információs és Monitoring Rendszer adatait (Várallyay et al., 2009). Ezen források mellett a másik fő adatszolgáltató a megyei MGSZH Növény- és Talajvédelmi Igazgatóságok, ahol a 70-es évek közepétől készült különböző célú (öntözési, meliorációs, hígtrágya elhelyezési stb.) talajtani szakvéleményekben fellelhető adatokat gyűjtötték össze. A MARTHA ver2.0 jelenleg 3937 db talajszelvény 15005 db talajrétegének talajfizikai, talajkémiai és talajvízgazdálkodási adatait tartalmazza.

Kutatásom során az adatbázis mintái közül csak azokat használtam a becslések kidolgozásához, amiknek a víztartó képessége mind a négy nevezetes mátrixpotenciálon – -0,1, -33, -1500 és -150000 kPa – meghatározta és rendelkeznek mért agyag, por, homok, szerves anyag, kalcium-karbonát tartalommal, vizes pH-val és térfogattömeggel is. Így az adott talajcsoporton belül, a különböző szívóerőkön történő becslések eredményei összehasonlíthatóak, hiszen a minták egyazon csoportján végeztük a vizsgálatokat és a minták száma sem befolyásolja a becslés pontosságát.

3.1. táblázat. A MARTHA ver2.0 adatbázisban található talajtulajdonságok.

Talajtulajdonság	Mintaszám	Százalék	
Talajrendszertani besorolás	Főtípus	15003	100,0%
	Típus	14748	98,3%
	Altípus	14736	98,2%
Talajszint száma		15 005	100,0%
Talajszint jelölése		14 995	99,9%
Minta tetejének magassága (cm)		14 948	99,6%
Minta aljának magassága (cm)		14 897	99,3%
Szerves anyag tartalom (tömeg%)		13 388	89,2%
CaCO ₃ tartalom (tömeg%)		11 455	76,3%
Arany-féle kötöttség		14 696	97,9%
pH 1:2,5 arányú talaj-víz szuszpenzió esetén		14 770	98,4%
pH 1:2,5 arányú talaj-KCl szuszpenzió esetén		7 542	50,3%
Na ₄ OAc.-os kicserélhető aciditás (cmol (+) kg ⁻¹)		3 151	21,0%
KCl-os kicserélhető aciditás (cmol (+) kg ⁻¹)		979	6,5%
Vízben oldható só tartalom (tömeg%)		11 898	79,3%
Kicserélhető Na tartalom (cmol (+) kg ⁻¹)		5 712	38,1%
T-érték (kationcserélő kapacitás) (cmol (+) kg ⁻¹)		10 313	68,7%
S-érték (Na, K, Ca, Mg ionok összege) (cmol (+) kg ⁻¹)		330	2,2%
Agyagtartalom (< 0,002 mm) (tömeg%)		14 311	95,4%
Portartalom (USDA) (0,05-0,002 mm) (tömeg%)		14 322	95,4%
Homoktartalom (USDA) (2,0-0,05 mm) (tömeg%)		14 311	95,4%
Portartalom (0,02-0,002 mm)(tömeg%)		14 313	95,4%
Homoktartalom (2,0-0,02 mm) (tömeg%)		14 310	95,4%
Portartalom (0,005-0,002 mm) (tömeg%)		14 313	95,4%
Finom homoktartalom (0,25-0,1 mm) (tömeg%)		14 064	93,7%
Durva homoktartalom (1,0-0,5 mm) (tömeg%)		14 064	93,7%
Térfogattömeg (kg dm ⁻³)		12 629	84,2%
Sűrűség (t m ⁻³)		440	2,9%
Nedvességtartalom -0,1 kPa-on = pF0 (térfogat%)		12 739	84,9%
Nedvességtartalom -0,25 kPa-on = pF0,4 (térfogat%)		999	6,7%
Nedvességtartalom -1 kPa-on = pF1,0 (térfogat%)		1 849	12,3%
Nedvességtartalom -3 kPa-on = pF1,5 (térfogat%)		4 036	26,9%
Nedvességtartalom -10 kPa-on = pF2,0 (térfogat%)		7 870	52,4%
Nedvességtartalom -20 kPa-on = pF2,3 (térfogat%)		889	5,9%
Nedvességtartalom -33 kPa-on = pF2,5 (térfogat%)		12 663	84,4%
Nedvességtartalom -250 kPa-on = pF3,4 (térfogat%)		1 753	11,7%
Nedvességtartalom -1500 kPa-on = pF4,2 (térfogat%)		12 759	85,0%
Higroszkópos nedvességtartalom (-1,5x10 ⁵ kPa = pF6,2) (térfogat%)		12 483	83,2%
Hidraulikus vezetőképesség (cm nap ⁻¹)		2 879	19,2%

A MARTHA adatbázist tároló program magyar nyelvű, de hamarosan angolul is elérhető lesz. A kezelőszoftver menük segítségével működik. A felhasználó a talajszelvény azonosítói, és az azt alkotó rétegek alapján kiválaszthatja a megfelelő talajmintát. A kiválasztott talajminta tulajdonságai egymást fedő oldalakon találhatók: általános, kémiai és fizikai tulajdonságokra a következőképpen vannak felosztva:

1. Az általános paraméterek tartalmazzák a talajszelvényre vonatkozó alapvető információkat (azonosító; pont típus [adatforrás típusa]; a megye neve, ahol a

talajszelvény elhelyezkedett; EOY koordináták; GPS koordináták; talajtípus és altípus); a kiválasztott talajszelvényről készült kép és elhelyezkedése a térképen (Google Map kapcsolattal); a kiválasztott talajszelvény genetikai szintjei (azok jele és mélysége).

2. A kémiai paraméterek a desztillált vizes és kálium-kloridos pH-ra, a hidrolitos és kicserélhető aciditásra (y_1 , y_2); a mésztartalomra; a sótartalomra; a kicserélhető nátrium mennyiségére; a T és S értékre és a szervesanyag-tartalomra vonatkozó adatokat tartalmazzák.

3. A fizikai paraméterek a víztartó képesség (talaj által visszatartott nedvességtartalom -0,1; -0,25; -1; -3; -10, -20, -33, -250, -1500 és $-1,5 \times 10^5$ KPa nyomással szemben), mechanikai összetétel (0,25-2 mm; 0,05-0,25 mm; 0,02-0,05 mm; 0,01-0,02 mm; 0,005-0,01 mm; 0,002-0,005 mm; $<0,002$ mm); térfogattömeg; sűrűség; Arany-féle kötöttség; higroszkóposság; telített hidraulikus vezetőképesség adatokat tartalmazzák.

A talajtulajdonságokat (3.1. táblázat) a magyar szabványok (Buzás, 1993) szerint határozták meg.

A vizsgálatok során folyamatosan bővült az adatbázis, ezért a kutatás elején végzett előzetes elemzéseket a MARTHA ver1.0-án, a becslő módszerek kidolgozását pedig már a MARTHA ver2.0-án végeztem. A MARTHA ver1.0 adatbázist a ver2.0 elődje, ami 1095 db talajszelvény 3821 db talajszintjének mért talajtulajdonságait tartalmazta.

3.1.2. A nagyméretarányú genetikus talajtérképek információtartalma

A nagyméretarányú országos térképezés az 1960-as években genetikus üzemi talajtérképezési programként indult, majd az 1980-as években felgyorsult és kisebb módszertani módosítással az Egységes Országos Térkép Rendszer (EOTR) térképszelvényei szerinti felvételezéssel, szisztematikusan haladt (Baranyai, 1989). Célja a talajok termékenységének jellemzése, ami alapvető információt nyújt a magyarországi talajkészlet racionális mezőgazdasági hasznosításához. A talajtérképek a helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok eredményeiből származtatott információt jelenítik meg, határértékekkel meghatározott kategóriákkal. Léptékük 1:10000, mely alkalmas a talajtulajdonságok jellemzésére tábla szinten. A felvételezés megindulásakor a térképezést „A genetikus üzemi talajtérképezés módszerkönyve” (Szabolcs, 1966) elvei alapján végezték. Az 1980-as években a korábbi tapasztalatok, az új információk iránti igények és az újabb rutinvizsgálatok megjelenésének hatására módosították a talajfelvételezés szabályait. A talajok változati tulajdonságai elhatárolásának szabályait a Mezőgazdasági és Élelmiszerügyi Minisztérium rendelete rögzítette (MÉM, 1986). Az „Útmutató a nagyméretarányú országos talajtérképezés végrehajtásához” című könyv (Baranyai, 1989) a talajtérképezés megújított módszerének teljes, a gyakorlatnak szánt és magyarázatokkal ellátott leírását tartalmazza. A talajtérképek az ország mezőgazdasági területének 70%-ára készültek el (Tóth és Máté, 2006; Jones et al., 2005). A térképeken a talaj genetikai, kémiai és fizikai tulajdonságai szerepelnek.

Talajvízgazdálkodási tulajdonságokat – a talajvízkartogramokon feltüntetett talajvíz mélysége és minősége adatokon kívül – az 1:10000 léptékű talajtérkép sajnos nem tartalmaz, és talajvíz kartogramok is csak kevés esetben készültek. A térképezés tehát

sokszor az adott igényeknek és a lehetőségeknek megfelelően történt. Az alap talajtérképet (ami a talaj altípusát és fizikai féleségét mutatja), a humusz és a kémhatás és mészállapot kartogramot azonban minden esetben elkészítették. A 3.2. táblázatban látható a talajtérképeken és kartogramokon megjelenített talajinformációk felsorolása.

A nagyméretarányú térképezéskor ugyan nem mérték közvetlenül víztartó képességet, de a meglévő térképek nagyszerű lehetőséget nyújtanak arra, hogy a talaj becsülhető vízgazdálkodási tulajdonságait adataik segítségével a térképezett területekre megállapítsuk. Mivel az eddig elkészült 1:100000-es méretarányú térképek nagy része a 80-as évek megújított útmutatója (Baranyai, 1989) alapján készült, ezért az ebben az útmutatóban (Baranyai, 1989) meghatározott talajinformációkat – talajjellemzőket a megjelölt kategóriák alapján – vettem alapul a becslő módszerek input paramétereikhez.

A talajképző kőzet, valamint a talajvíz és a talajtermékenységet és talajhasználatot befolyásoló tulajdonságok kartogramon szereplő talajparaméterek víztartó képességre gyakorolt hatását nem tudtam vizsgálni, mert ezen talajtulajdonságok nem szerepelnek a MARTHA adatbázisban.

3.2. táblázat. A talajtérképek és kartogramok információtartalma.

Talajtérkép, kartogram típusa	Talajtérképen, kartogramon feltüntetett tulajdonságok
Talajtérkép	a talaj típusa, altípusa, talajképző kőzet, felső vagy művelt réteg fizikai félesége
Humusz kartogram	humuszos réteg vastagsága, felső vagy művelt réteg humusztartalma
Kémhatás és mészállapot kartogram	felső vagy művelt réteg kémhatása, CaCO_3 megjelenési mélysége, CaCO_3 tartalom a megjelenés mélységében, a felső vagy művelt réteg savanyúsága, a visszameszeződés mértéke
Talajvíz kartogram	átlagos talajvízszint, talajvíz sótartalma és $\text{Na}\%$ -a
Szikesedési tulajdonságok kartogram	a szikes tulajdonságú talajréteg megjelenési mélysége, kémhatása, vízben oldható összes sótartalma, illetve a kicserélhető Na tartalom „S” %-ban kifejezett értéke; a maximális szikes tulajdonságú talajréteg megjelenési mélysége, kémhatása, vízben oldható összes sótartalma és a kicserélhető Na tartalom „S” %-ban kifejezett értéke
Talajtermékenységet és talajhasználatot befolyásoló tulajdonságok kartogram	eróziós fokozatok és defláció, az eltemetett, ill. kovárványos réteg megjelenési mélysége, kő és kavics tartalom, termőréteg vastagság, talajhibák, talajhibák vastagsága.

A szikesedési tulajdonságok kartogram csak a szikes főttípusú talajok, illetve a nem szikes, de szoloncsákos és szolonyeces típusú, altípusú és változatú talajokra (3.3. táblázat) készült el (Baranyai, 1989). Ennek megfelelően a szikes talajokra vonatkozó becslés kidolgozásához ezen altípusú talajokat választottam ki.

3.3. táblázat. Talajaltípusok, melyekre készült szikesedési tulajdonságok kartogram (Baranyai, 1989).

Főtípus	Típus	Altípus
csernozjom talajok	réti csernozjom talajok	203. mélyben sós réti csernozjom talaj 204. mélyben szolonyeces réti csernozjom talaj 205. szolonyeces réti csernozjom talaj
szikes talajok	szoloncsák talajok	-221. karbonátos szoloncsák -222. karbonátszulfátos szoloncsák -223. karbonátkloridos szoloncsák
	szoloncsák-szolonyec talajok	-231. karbonátos szoloncsák-szolonyec -232. karbonátszulfátos szoloncsák-szolonyec -233. karbonátkloridos szoloncsák-szolonyec
	réti szolonyec talajok	-241. kerges réti szolonyec talajok -242. közepes réti szolonyec talajok -243. mély réti szolonyec talajok
	sztyeppesedő réti szolonyec talajok	-251. közepes sztyeppesedő réti szolonyec -252. mély sztyeppesedő réti szolonyec
	260. szology talajok	
	másodlagosan elszikesedett talajok	-271. szoloncsákos másodlagosan elszikesedett talaj -272. szolonyeces másodlagosan elszikesedett talaj
réti talajok	szoloncsákos réti talajok	-281. szulfátos vagy kloridos szoloncsákos réti talaj -282. karbonátos szoloncsákos réti talaj
	szolonyeces réti talajok	-291. szolonyeces -292. erősen szolonyeces
	réti talajok:	-303. mélyben sós réti talaj -304. mélyben szolonyeces réti talaj
	lápos réti talajok	-322. szoloncsákos lápos réti talaj -323. szolonyeces lápos réti talaj
	csernozjom réti talajok	-333. mélyben sós vagy mélyben szolonyeces csernozjom réti talaj -334. szolonyeces csernozjom réti talaj

A fizikai féleségen, szerves anyag és kalcium karbonát tartalmon és vizes pH-n kívül a becslésben még a vízben oldható összes sótartalmat lehet figyelembe venni a víztartó képesség számításához. A dőlt betűvel szedett altípusok esetén úgy ítélték meg, hogy a talajtermékenység szempontjából a humuszos rétegnek és humusztartalomnak alárendelt szerepe van, ezért ezen talajok esetén nem készült humuszkartogram, tehát nem ismerjük a szervesanyag tartalmukat. Az 1-4. mellékletekben látható a térképi és a kartogramokon feltüntetett kódoknak megfelelő, fizikai féleség, vizes pH, kalcium-karbonát és sótartalom.

A fizikai féleség kódok között szereplő kotu, tőzeg valamint a durva vázrészek víztartó képességre gyakorolt hatását nem tudtam vizsgálni, mert a rendelkezésre álló adatbázisban ezen talajtulajdonságokról – amik általában nem a talaj fizikai féleségéhez tartoznak – nem szerepelt információ.

A szerves anyag tartalmat jellemző kód jelentése altípusonként és fizikai féleségenként különböző lehet (Baranyai, 1989), ami a becslésnél gondot okoz (pl a hármas szerves anyag kód a Ramann-féle barna erdőtalajoknál, ha a fizikai féleség durva homok vagy homok, 1-1,5 % szervesanyag-tartalomnak felel meg, ha viszont homoknál finomabb, akkor 1,5-3 %-nak). Tehát szükséges volt egy egységes kódolás létrehozása (lásd 3.1.3 fejezet).

A Na^+ tartalom S%-ban kifejezett értékét nem lehetett bevonni a becslésbe, mert a MARTHA adatbázisban ez a talajtulajdonság nem szerepel. A szikes talajok nagy részére a kicserélhető nátrium tartalom rendelkezésre áll, de a bázikus kationokról nincs mért adatunk. Sajnos a rendelkezésre álló információ tartalom a Na^+ szempontjából nem átjárható a szikes kartogram és a vizsgálatához használt adatbázis között.

3.1.3. A vizsgálati adatbázis előkészítése a kutatás specifikus céljaira

3.1.3.1. Térképi kódok képzése az adatbázisban szereplő talajadatokra

Ahhoz, hogy a MARTHA adatbázis alapján a 1:10000-es méretarányú talajtérképekre alkalmazható becslő módszert dolgozzak ki, a folytonos mért talajtulajdonságok alapján hozzárendeltem (képeztem) minden talajszint esetén az egyes attribútumokra jellemző térképi kódokat.

A talajaltípust, fizikai féleséget, humusz és kalcium-karbonát tartalmat, vízdoldhatóság-tartalmat, valamint pH-t jellemző térképi kódot minden mintára megadtam az 1-8. mellékleteknek megfelelően. A minták fizikai féleségét Arany-féle kötöttségük alapján állapítottam meg (Baranyai, 1989). A sótartalmat jellemző kódot azonban csak a Baranyai (1989) szerinti szikes altípusokra képeztem, mert azt csak a szikes kartogramokon jelölik, amit a többi altípus esetén nem készítenek el.

Amint azt már említettem a humusz kartogramokon szereplő humusztartalmat jellemző kód jelentését az altípus és a fizikai féleség határozza meg. Ahhoz, hogy a becslésben figyelembe tudjuk venni a humusz kód által nyújtott információt, azt egyszerűsíteni kellett. Ezért az elkülönített csoportokra egységesítettem a humusztartalom kategóriák határait. A 5-8. mellékletekben látható a talajcsoportok átalakított kódjai és azok jelentései.

3.1.3.2. Az adatbázis szűrése és felosztása

A becslő módszerek kidolgozásához a MARTHA ver2.0 adatbázist először felosztottam. Ennek két fő oka volt.

A felosztás egyik oka az volt, hogy a részletes genetikai talajtérképeken feltüntetett talajtulajdonságok talajtípusként különbözhetnek, ezért első lépésben a becsléshez rendelkezésre álló input paraméterek (vagyis a talajtérképekről leolvasható talajtulajdonságok) alapján csoportosítottam az adatbázis talajait. Ekkor vettem figyelembe, hogy a szikesedési tulajdonság kartogram csak a szikes altípusokra készült el, így azoknál a talajoknál a sótartalmat is figyelembe vehettem a víztartó képesség becsléséhez.

A csoportosítás másik oka az volt, hogy a térképeken feltüntetett humusz tartalmat jellemző kategóriák jelentése altípusonként eltérő lehet (Baranyai et al., 1989), ami problémát okoz a kategóriák alapján történő becslés kidolgozásakor. A talajcsoportokra kialakított egységesített humuszkategóriák könnyebben (5-8. melléklet) kezelhetők a becslés kidolgozásakor.

További vizsgálataimat négy jellegzetes főtípus talajaival végeztem. A főtípusok kiválasztásánál azok nagy területi kiterjedése és speciális vízgazdálkodási tulajdonságaik voltak fő szempontjaim. A vizsgálatba vont talajok és azok százalékos országos területi kiterjedése (Stefanovits et al 1999 szerint) a következők: barna erdőtalajok (34,6%), csernozjom talajok (22,4%), szikes talajok (6%) és réti talajok (13, 1%). A négy nagy talajféleség tehát az ország több mint háromnegyedét (76,1%-át) fedi, és a mezőgazdasági művelt területekben meglévő arányuk is hasonlóan jelentős. Az adatbázis megfelelő területi reprezentáltsággal tartalmazza a négy talajfőtípus mintáinak adatait (3.1.-3.4. ábrák) és mintaszámuk is megfelelőnek tűnt az egymástól függetlenített elemzésekhez (3.4. táblázat). Az említett főtípusokra külön-külön becslő módszereket dolgoztam ki. Az adatbázis A és B genetikai szintekből vett mintáit használtam az elemzésekhez, abból a megfontolásból, hogy ezekben a szintekben van a talajképződésnek olyan hatása, ami az egyes talajosztályokra (főtípus, típus, altípus) jellemző lehet, így az altípus figyelembe vétele javíthatja a becslést. A szikes talajok esetében – eltérően a másik három talajcsoporttól – a genetikai C-szintet is bevontam a vizsgálatba. Azért döntöttem így, mert a szikesek meghatározó tulajdonsága (magas sótartalom, illetve az ebből adódó kiválások) ebben a szintben is meghatározó lehet.

3.4. táblázat. A különböző talajcsoportok vizsgálatba vont mintáinak száma

Talajfőtípus	Becslő adatbázis mintaszáma (~90%)		Teszt adatbázis mintaszáma (~10%)		Talajminták száma összesen	
	A és B szintek	A, B és C szintek	A és B szintek	A, B és C szintek	A és B szintek	A, B és C szintek
Szikes talajok*	574	653	70	76	644	729
Barna erdőtalajok	763	1114	81	126	844	1240
Csernozjomok	1296	1495	146	168	1442	1663
Réti talajok	1150	1391	121	158	1271	1549

*Vizsgálataimhoz a nem szikes főtípusba tartozó sós és szolonycses változatokat is ide soroltam.

A klasszifikációs fák alkalmazásához és a lineáris regressziós vizsgálatokhoz minden talajcsoport esetén két részre osztottam fel az adatbázist, tanuló (becslő) és teszt részre. (A

faktoranalízist a teljes eredeti – nem megosztott - adatbázissal végeztem.) Az adatok random kiválasztott 90 %-án dolgoztam ki a becslő módszereket (tanuló adatok) és a maradék 10%-án ellenőriztem a kidolgozott módszerek becslési megbízhatóságát. A 90-10%-os felosztást az indokolta, hogy a klasszifikációs fák megbízhatóságát erősen befolyásolja a tanuló adatok száma, mert még a kialakított talajcsoportok esetén is heterogének az adatok, ami abból adódik, hogy a főtípusokon belül is elég változatos talajok fordulnak elő. A lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvényeket minden talajcsoport esetén az adatok 90%-án dolgoztam ki, hogy lehetőség legyen a módszer megbízhatóságának vizsgálatára a fennmaradó 10%-on.

Szikes talajok

A 3.3. táblázat szerinti altípusok kiválasztásával kapott szikes talajcsoport 246 db talajszelvényt tartalmaz, amihez 729 db talajszint tartozik (3.5. táblázat).

3.5. táblázat. A MARTHA adatbázis szikes tulajdonságú talajainak jellemzése.

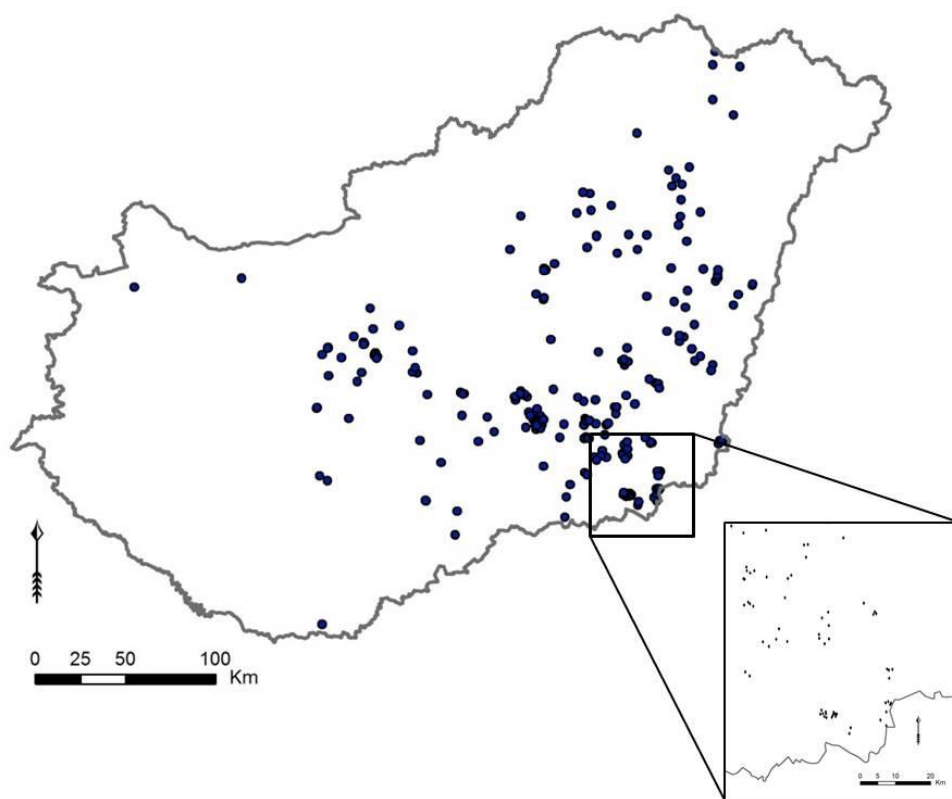
Talajtulajdonság	Mintas szám	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Variancia
Talajaltípus	729	-	-	-	-	-
Agyagtartalom (< 0,002 mm) (tömeg%)	729	2,08	67,83	32,29	14,25	203,18
Portartalom (0,002-0,05 mm) (tömeg%)	729	1,06	74,39	43,29	14,10	198,80
Homoktartalom (0,05-2 mm) (tömeg%)	729	0,30	95,77	24,42	20,49	419,76
Térfogattömeg (g cm ⁻³)	729	1,07	1,87	1,44	0,16	0,03
Humusz tartalom (tömeg%)	729	0,1	4,7	1,6	1,2	1,4
Kalcium-karbonát tartalom (tömeg%)	729	0,00	80,00	15,75	13,49	182,11
Vizes pH	729	6,19	10,62	8,58	0,77	0,59
Vízoldhatósó-tartalom (tömeg%)	714	0,00	1,20	0,14	0,15	0,02
$\theta_{-0,1\text{kPa}}$ (tf%)	729	26,40	75,60	46,86	6,02	36,24
$\theta_{-33\text{kPa}}$ (tf%)	729	4,60	63,70	33,11	8,02	64,33
$\theta_{-1500\text{kPa}}$ (tf%)	729	0,40	38,00	19,83	7,12	50,70
$\theta_{-150000\text{kPa}}$ (tf%)	729	0,15	9,93	3,70	2,13	4,55

A szikes főtípusú és szoloncsákos réti talajok esetén, a térképeken nem tüntetik fel a szerves anyag tartalmát jellemző kódot, ezért a hozzájuk tartozó altípusok esetén vizsgáltam, hogy hogyan változik a becslés pontossága és megbízhatósága, ha a humusztartalom nem szerepel a becslésben beviteli paraméterként. A MARTHA ver2.0 adatbázis 70 db olyan talajszelvényt (208 db talajszintet) tartalmaz, ami megfelel az említett kritériumoknak. A 3.6. táblázatban láthatók az adatbázis ezen talajainak jellemzői.

3.6. táblázat. A MARTHA adatbázis szikes főtípusú és szoloncsákos réti típusú talajainak jellemzése (ezen talajok esetén nem készül humuszkartogram, tehát nincs információ a szerves anyag tartalomról).

Talajtulajdonság	Mintaszám	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Variancia
Talajaltípus	208	-	-	-	-	-
Agyagtartalom (< 0,002 mm) (tömeg%)	208	2,87	64,45	30,44	15,19	230,77
Portartalom (0,002-0,05 mm) (tömeg%)	208	1,06	74,12	41,05	15,99	255,69
Homoktartalom (0,05-2 mm) (tömeg%)	208	0,30	95,77	28,51	24,26	588,74
Térfogattömeg (g cm ⁻³)	208	1,07	1,87	1,48	0,18	0,03
Humusz tartalom (tömeg%)	208	0,1	4,6	1,1	1,0	1,1
Kalcium-karbonát tartalom (tömeg%)	208	0,00	80,00	20,53	16,02	256,58
Vizes pH	208	6,92	10,62	8,93	0,79	0,62
Vízoldhatósó-tartalom (tömeg%)	195	0,00	1,20	0,19	0,22	0,05
$\theta_{-0,1\text{kPa}}$ (tf%)	208	26,40	66,00	45,60	7,28	52,99
$\theta_{-33\text{kPa}}$ (tf%)	208	4,60	52,77	32,36	9,29	86,28
$\theta_{-1500\text{kPa}}$ (tf%)	208	0,40	36,30	18,53	7,87	61,94
$\theta_{-150000\text{kPa}}$ (tf%)	208	0,18	13,60	3,36	2,49	6,20

A szikes tulajdonságú minták származási helyét (a talajszelvények földrajzi elhelyezkedését) a 3.1. ábra mutatja.



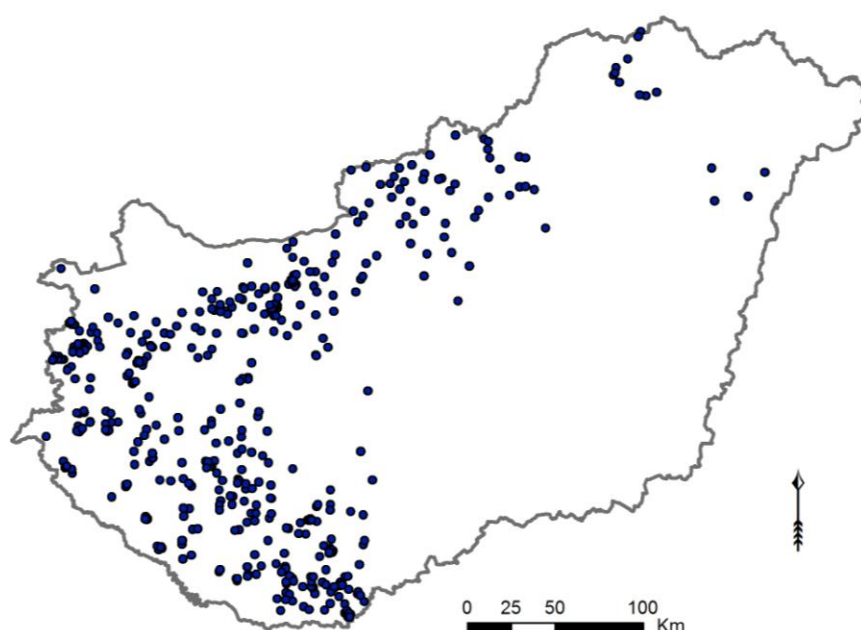
3.1. ábra. Az adatbázis szikes mintáinak származási helye, áttekintő térképen és részletes bemutatásban

Barna erdőtalajok

A MARTHA ver2.0 adatbázis 492 db barna erdőtalaj főtípusú talajszelvényt tartalmaz, ezekhez 1240 db talajszint tartozik. Az 3.7. táblázat mutatja be a vizsgálatba bevont barna erdőtalajok jellemző tulajdonságait. A barna erdőtalaj minták származási helyét (a talajszelvények földrajzi elhelyezkedését) a 3.2. ábra mutatja.

3.7. táblázat. A MARTHA adatbázis barna erdőtalajainak jellemzése.

Talajtulajdonság	Mintasám	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Variancia
Talajtípus	1240	-	-	-	-	-
Agyagtartalom (< 0,002 mm) (tömeg%)	1240	0,58	79,43	22,36	10,47	109,69
Portartalom (0,002-0,05 mm) (tömeg%)	1240	1,44	98,10	43,09	18,49	341,85
Homoktartalom (0,05-2 mm) (tömeg%)	1240	0,99	95,00	34,55	24,25	587,85
Térfogattömeg (g cm ⁻³)	1240	1,11	1,95	1,51	0,13	0,02
Humusz tartalom (tömeg%)	1240	0,0	3,5	0,8	0,6	0,3
Kalcium-karbonát tartalom (tömeg%)	1240	0,00	76,00	8,35	11,88	141,14
Vizes pH	1240	4,50	9,36	7,47	0,77	0,60
Vízoldhatósó-tartalom (tömeg%)	1240	29,10	61,00	44,60	5,21	27,11
$\theta_{-0,1\text{kPa}}$ (tf%)	1240	3,36	53,20	29,73	7,07	49,95
$\theta_{-33\text{kPa}}$ (tf%)	1240	1,50	36,50	14,44	6,05	36,55
$\theta_{-1500\text{kPa}}$ (tf%)	1240	0,05	10,70	2,23	1,48	2,18



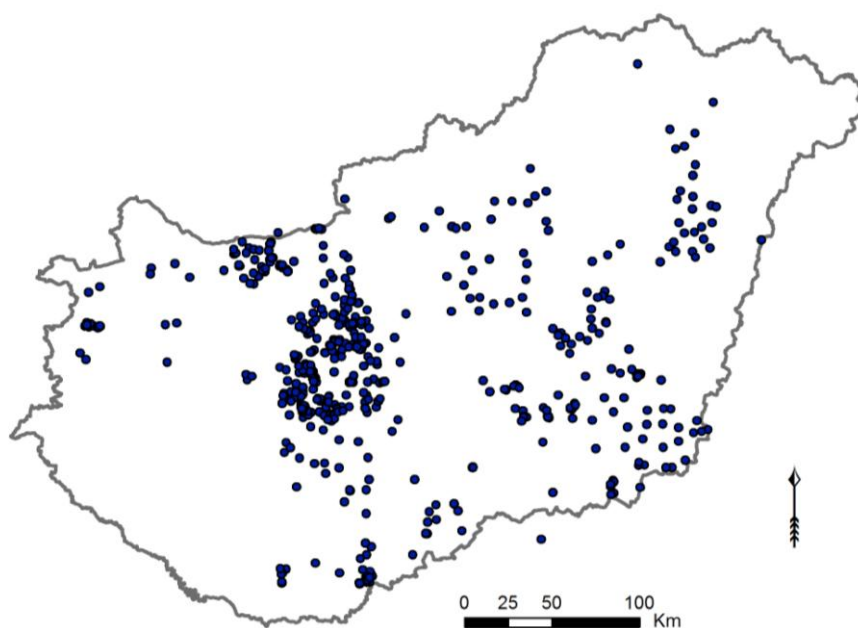
3.2. ábra. Az adatbázis barna erdőtalaj mintáinak származási helye, áttekintő térképen.

Csernozjomok

A MARTHA ver2.0 adatbázisban 622 db talajszelvény 1922 db talajszintje szerepelt csernozjom főtípusú nem szikes altípusú talajként. Baranyai et al. (1989) azon talajokat, amik 0,15 %-nál több vízben oldható sótartalmat tartalmaznak, szikes altípusba sorolja. Azon talajokat, amelyek az említettől több sótartalmat tartalmaznak, kiszűrtem az adatbázisból, hogy valóban azokat a mintákat vizsgálhassam, amik nem szikesek. Így az adatbázis 594 db nem szikes (nem sós) csernozjom talajszelvényt tartalmaz, amikhez 1663 db szint tartozik (3.8. táblázat). A csernozjom minták származási helyét (a talajszelvények földrajzi elhelyezkedését) a 3.3. ábra mutatja.

3.8. táblázat. A MARTHA adatbázis nem szikes csernozjom talajainak jellemzése.

Talajtulajdonság	Mintaság	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Variancia
Talajaltípus	1663	-	-	-	-	-
Agyagtartalom (< 0,002 mm) (tömeg%)	1663	0,30	56,29	23,43	8,09	65,37
Portartalom (0,002-0,05 mm) (tömeg%)	1663	1,89	78,00	46,75	13,53	183,13
Homoktartalom (0,05-2 mm) (tömeg%)	1663	0,44	95,94	29,81	17,72	314,04
Térfogattömeg (g cm^{-3})	1663	1,04	1,83	1,39	0,12	0,02
Humusz tartalom (tömeg%)	1663	0,0	5,5	1,7	1,0	1,0
Kalcium-karbonát tartalom (tömeg%)	1663	0,00	53,00	15,30	11,22	125,91
Vizes pH	1663	5,06	10,36	8,02	0,42	0,18
Vízoldhatóság-tartalom (tömeg%)	1663	29,60	59,86	47,92	4,52	20,43
$\theta_{-0,1\text{kPa}}$ (tf%)	1663	4,33	45,67	31,10	5,03	25,35
$\theta_{-33\text{kPa}}$ (tf%)	1663	1,10	34,50	15,42	5,17	26,68
$\theta_{-1500\text{kPa}}$ (tf%)	1663	0,20	10,88	2,61	1,30	1,68



3.3. ábra. A csernozjom talajból vett minták származási helye, áttekintő térképen.

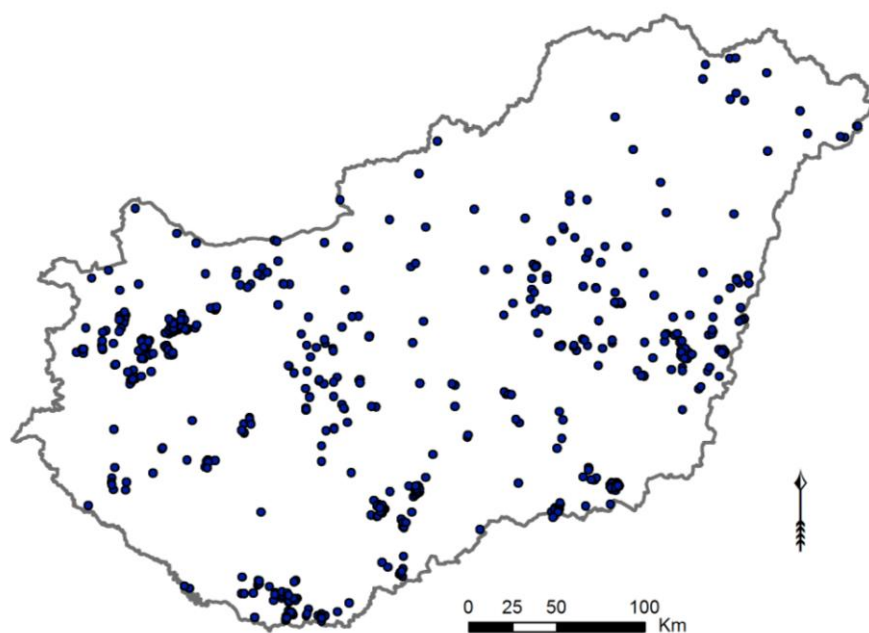
Réti talajok

A csernozjom talajokhoz hasonlóan a réti talajok esetén is kiszűrtem azokat a mintákat amiknek a sótartalma 0,15 %-nál nagyobb. Az adatbázis 610 db nem szikes (nem sós) réti talajszelvényt tartalmaz, amihez 1549 db szint tartozik (3.9. táblázat).

3.9. táblázat. A MARTHA adatbázis nem szikes réti talajainak jellemzése.

Talajtulajdonság	Mintasza	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Variancia
Talajtípus	1549	-	-	-	-	-
Agyagtartalom (< 0,002 mm) (tömeg%)	1549	0,05	66,66	28,57	12,73	162,06
Portartalom (0,002-0,05 mm) (tömeg%)	1549	0,67	77,34	42,04	14,87	221,03
Homoktartalom (0,05-2 mm) (tömeg%)	1549	0,33	98,20	29,39	21,38	457,00
Térfogattömeg (g cm ⁻³)	1549	1,00	1,92	1,44	0,15	0,02
Humusz tartalom (tömeg%)	1549	0,0	10,0	1,7	1,2	1,5
Kalcium-karbonát tartalom (tömeg%)	1549	0,00	69,00	12,39	12,97	168,19
Vizes pH	1549	4,30	10,07	7,94	0,55	0,31
Vízoldhatósó-tartalom (tömeg%)	1549	29,60	69,20	47,17	5,55	30,76
$\theta_{-0,1\text{kPa}}$ (tf%)	1549	6,58	56,00	34,15	6,82	46,51
$\theta_{-33\text{kPa}}$ (tf%)	1549	1,40	43,30	18,85	6,84	46,84
$\theta_{-1500\text{kPa}}$ (tf%)	1549	0,10	10,50	3,38	1,89	3,57

A réti tulajdonságú minták származási helyét (a talajszelvények földrajzi elhelyezkedését) a 3.4. ábra mutatja.



3.4. ábra. Az adatbázis réti talajú mintáinak származási helye, áttekintő térképen.

Amint azt feljebb említettem, a négy különválasztott csoport esetén (barna erdőtalajok, nem szikes csernozjomok, szikes és nem szikes réti talajok) az adatbázist a vizsgálatok előtt kettéosztottam: becslő adatbázisra, ami az adatok 90 %-át tartalmazza (amin a módszereket kidolgoztam) és teszt adatbázisra, ami az adatok fennmaradó 10 %-a (amin a kidolgozott becslő módszerek megbízhatóságát ellenőriztem). A 3.4. táblázatban látható, hogy hány mintát tartalmaznak a becslő és a teszt adatbázisok elkülönített talajcsoportonként.

3.2. Az alkalmazott vizsgálati és modellfejlesztési módszerek

A kutatási célkitűzéseknek és a megfogalmazott munkahipotézisnek megfelelően, a hazai és nemzetközi szakirodalom feldolgozása után statisztikai vizsgálatokat végeztem a teljes adatbázison majd az osztályozott adatcsoportokon is.

Első lépésben - a MARTHA ver.1.0 adatbázison - a víztartó képesség kialakításában szerepet kapó talajtérképeken feltüntetett talajtulajdonságokat vizsgáltam. Faktoranalízissel elemeztem, hogy a talaj víztartó képességének becsléséhez a nagyméretarányú talajtérképekről leolvasható talajtulajdonságok közül melyek fontosak, és a fontos talajtulajdonságok hatása vajon eltér-e, ha különböző mintacsoportot pl. főtípusok szerinti talajokat nézünk.

Második lépésben – az időközben kiteljesedő MARTHA ver.2.0 adatbázison – dolgoztam ki a talajtérképekre alkalmazható talajvíztartó képességet becslő új módszert és hasonlítottam ennek eredményét a hagyományos módszerekkel kapott eredményekhez. Ahhoz, hogy a talajtérképeken szereplő információk alapján tudjuk számítani a talaj víztartó képességét, egy olyan statisztikai eljárást kellett alkalmazni, amivel kategória típusú (nominális és ordinális) független változók alapján folytonos függő változót lehet becsülni. Ennek oka, hogy a pedotranszfer függvények alkalmazásához folytonos talajtulajdonságok ismerete szükséges, a talajtérképeken viszont kategória típusú, ordinális vagy nominális tulajdonságok vannak feltüntetve. A folytonos függő (víztartó képesség) és kategória típusú független változók (talajtulajdonságok) kezelésére a regressziós fa módszert (CRT_kat) találtam a legmegfelelőbbnek. A regressziós fával a folytonos talajtulajdonságok alapján is kidolgoztam a becslő módszert (CRT). A víztartó képesség becslését kategória adatok alapján, a regressziós fa mellett (CRT_kat), a talajfizikai kutatásban újdonságnak számító CHAID (Chi-squared Automatic Interaction Detection) típusú klasszifikációs módszerrel is vizsgáltam. Ezzel párhuzamosan többszörös lineáris regresszióval folytonos pedotranszfer függvényeket (LR) is kidolgoztam, hogy összehasonlíthassam a lineáris kapcsolatokat feltételező módszer (LR) és a regressziós fa (CRT) becslési eredményeit.

Az alábbiakban az alkalmazott eljárásokat részletesen is ismertetem.

3.2.1. Előzetes vizsgálatok faktoranalízissel

A faktoranalízis egy olyan elemzési módszer, amely alkalmas többváltozós összefüggésrendszerek háttérváltozóinak feltárására, azok számának meghatározására és számszerű kifejezésére, így a komplex tulajdonságok is vizsgálhatóvá válnak (Sváb, 1979).

A módszer alkalmazása a talajtanban és azon belül a talajvízgazdálkodási kutatásokban is elterjedt. Lin et al. (1999) a faktorsúlyok becslésére főkomponens analízissel vizsgálta a talaj morfológiai, fizikai és egyes vízgazdálkodási tulajdonságai közötti kapcsolatokat. Vereecken

et al. (1989) szintén főkomponens analízis segítségével tárta fel a talaj víztartó képessége és egyéb talajtulajdonságok közötti kapcsolatokat.

Vizsgáltaim során faktoranalízissel elemeztem a talaj víztartó képessége és azon egyszerűen mérhető talajtulajdonságok összefüggéseit, amelyek nagy méretarányú (1:10000) talajtérképeken fel vannak tüntetve, és kapcsolatban állhatnak a talaj vízgazdálkodási tulajdonságaival.

A faktoranalízis vizsgálatokat a teljes adatbázison és külön főtípusonként is elvégeztem.

A többváltozós statisztikai elemzéseket az SPSS 14.0 statisztikai programcsomaggal végeztem el (Norusis, 1994). Az összefüggés vizsgálatok során kapott kezdeti faktor értékeket főkomponens analízissel becsültem. A megtartandó (legnagyobb befolyással bíró) faktorok számát az általuk magyarázott variancia relatív aránya alapján határoztam meg. Az eredmények értékeléséhez VARIMAX forgatást alkalmaztam Kaiser normalizációval (Norusis, 1994). Az elforgatott komponens mátrix alapján lehetővé vált a komponens csoportokon belüli legszignifikánsabb változók feltárása és a változók közötti keresztkapcsolatok elemzése. Először a teljes adatbázison futtatam le a faktoranalízis elemzést, majd külön az adatbázisban előforduló főtípusokra is, melyek közül a csernozjom talajokra kapott eredményeket elemeztem ki részleteiben, hogy feltárjam a vizsgálati módszer talaj főtípussal kapcsolatos érzékenységét. A por frakciót kihagytam az elemzésből, mivel az az agyag- és homoktartalom ismeretében kiszámítható.

3.2.2. Módszerfejlesztés, modellillesztés és validálás

3.2.2.1. Általános elvek és módszerválasztás

Közismert, hogy a talaj bonyolult háromfázisú rendszer amelyben az anyagforgalmi folyamatok általában nem lineáris összefüggések mentén alakulnak. Ezért kutatási munkám során olyan statisztikai elemző eljárást kerestem, mely figyelembe tudja venni, hogy egyes független változók függő változóra gyakorolt hatása bizonyos feltételek mellett különböző erősségű, sőt ellentétes irányú is lehet.

A faktoranalízissel végzett vizsgálatok eredményei (4.1. fejezet) szintén arra mutattak rá, hogy a víztartó képesség becsléséhez olyan módszer lenne alkalmasabb, mely a függő és független változók közötti kapcsolatokat egy lineáris összefüggésnél komplexebben képes vizsgálni.

A rendszeren belüli nem lineáris kapcsolatokból eredő probléma megoldására a klasszifikációs, más néven döntési fák alkalmazása jelenthet megoldást. Ennek a módszernek, amellet, hogy a nemlineáris kapcsolatok értékelésére is alkalmas, nagy előnye, hogy eredményei könnyen értelmezhetők és magyarázhatók, ezzel lehetővé téve a talajtulajdonságok közötti összefüggések elemzését is.

A regressziós fával történő becslés pontossága hasonló lehet, mint a lineáris regresszióé. Nem lineáris összefüggések jellemzésekor pontosabb eredményeket ad, jó lineáris összefüggések esetén viszont kevésbé pontos (Breiman et al., 1998). A talaj vízgazdálkodási tulajdonságai és az egyéb talajtulajdonságok közötti kapcsolat sokszor nem jellemezhető lineáris függvénnyel. Talajtani kutatásban többek között McKenzie és Jacquier (1997), Rawls és Pachepsky (2002), Lilly et al. (2008), Nemes et al. (2010) alkalmaztak és találták hasznosnak a regressziós fákat különböző talajvízgazdálkodási tulajdonságok becslésére.

Kiemelik a módszer azon előnyét, hogy lehetővé teszi a talajfizikai összefüggések összetettebb elemzését.

A talajvízgazdálkodási kutatásokkal foglalkozó szerzők (pl. McKenzie és Jacquier, 1997; Rawls és Pachepsky 2002; Lilly et al. 2008; Nemes et al. 2010) mind folytonos, mind kategória típusú független változók esetén a döntési fák regressziós típusát (*Classification and Regression Tree*, CRT) használták. Kategória típusú független változók esetén azonban, a CRT módszeren kívül, alkalmas még az úgynevezett CHAID (*Chi-squared Automatic Interaction Detection*) módszer is. A talajfizikai szakirodalomban azonban e becslő módszer alkalmazására nincs hivatkozás. A kutatási célkitűzésekben megfogalmazott cél - a talajtérképeken is szereplő talajkategóriák alapján történő vízgazdálkodási becslés - eléréséhez a kategóriák alapján becslő CHAID módszer alkalmazhatóságát is vizsgáltam a regressziós fa (CRT) mellett.

Az első CHAID típusú klasszifikációs becsléseket 2007-ben végeztük (Makó et al., 2007). A talajfizikai nemzetközi szakirodalomban nem találtunk példát a CHAID módszer alkalmazására, aminek több oka lehet. Az egyik lehetséges ok, hogy a talaj vízgazdálkodási tulajdonságok becslésekor a legtöbbször legalább egy folytonos változót bevonnak a modell input paramétereire közé (Guber et al, 2004; Rawls et al. 2004; Nemes et al., 2010), ebben az esetben hatékonyabb a CRT. Továbbá a CHAID módszer viszonylag újabb fejlesztésű módszer, néhány statisztikai programcsomagban pedig még csak az a változata hozzáférhető, ami a független változókat csak egyszer tudja figyelembe venni a fa építése során (amit egy szint kiépítésénél már használt, azt az alsóbb szinteken már nem vizsgálja).

Kutatásaim során tehát az újdonságnak számító CHAID és a talajtani szakirodalomban használt CTR típusú klasszifikációs fákkal dolgoztam:

a) CHAID és CRT: kategória típusú (ordinális, nominális) független változókkal, melyek a térképi kategóriáknak felelnek meg tartalmazva a talaj altípusát is. Ezek a módszerek alkalmasak a talajtérképek alapján történő becslésre.

b) CRT: független változóként a talajtérképeken feltüntetett tulajdonságokat tartalmazza, de azokat folytonos értékeként: az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm), homok (0,05-2 mm) tartalmat, szerves anyag tartalmat, kalcium-karbonát tartalmat, pH-t és szikesek esetén a vízdoldhatóság-tartalmat is. Az altípust kategória változóként vonja be a vizsgálatba.

A szikes talajokon vizsgáltam, hogy mennyiben befolyásolja a becslés pontosságát és megbízhatóságát az, hogy folytonos vagy kategória adatok alapján végezzük el a becslést, mi a különbség a kategória értékek alapján kidolgozott regressziós és CHAID típusú fák között, az altípus mennyiben befolyásolja a becslés pontosságát és összehasonlítottam a klasszifikációs fákkal és a lineáris regresszióval történő becslések pontosságát és megbízhatóságát. Ezen eredmények alapján választottam ki a becsléshez leghatékonyabb módszereket és végeztem el a becslés kidolgozását a többi talajcsoportra.

A klasszifikációs fa módszerrel kapott becslő modelleket a Magyarországon előforduló főbb talaj főtípusonként – **barna erdőtalajok, csernozjomok, szikesek és réti talajok** – összehasonlítottam. Elemeztem, hogy főtípusonként a becsléshez rendelkezésre álló talajtulajdonságok közül melyek befolyásolják a víztartó képességet négy nevezetes mátrixpotenciálon (**-0,1 kPa, -33 kPa, -1500 kPa, -150000 kPa**).

A -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom, tehát a higroszkópos nedvességtartalom ismeretének mezőgazdasági és környezetgazdálkodási szempontból jóval kisebb a jelentősége, mint a -0,1, -33 és -1500 kPa mátrixpotenciálok nedvességtartalmának. Becslését az indokolta, hogy a pF-görbe leírásához végzett mérések során hagyományosan meghatározták a higroszkópos nedvességtartalmat. Korábban ebből becsültek egyéb nehezebben mérhető talajtulajdonságokat, például: agyag tartalmat, holtvíz tartalmat vagy egyéb víztartó képesség értékeit (Mados, 1939; Kreybig, 1951). A MARTHA ver 2.0 adatbázis a minták több mint 50 %-ára tartalmaz mért víztartó képesség adatokat mind a négy gyakran használt víztartó képesség értékre (-0,1, -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciál értékeken), ezért a higroszkópos nedvesség becslését is elvégeztem.

A négy nevezetes mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmakon felül azt is vizsgáltam, hogy a becsült -33 és -1500 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó nedvességtartalom értékek alapján számított **hasznosítható vízkészlet (HV)** milyen pontos és megbízható. A számolási eljárást az alábbi képlet (21. sz. egyenlet) mutatja be:

$$HV = \Theta_{-33\text{kPa}} - \Theta_{-1500\text{kPa}} \quad (21)$$

ahol HV: hasznosítható vízkészlet, $\Theta_{-33\text{kPa}}$: -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom (szabadföldi vízkapacitás), $\Theta_{-1500\text{kPa}}$: -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom (holtvíz tartalom) (Stefanovits et al., 1999).

Érdemes megjegyezni, hogy mivel a klasszifikációs fákkal történő becslés során szabályokat alkalmazunk az ismeretlen víztartó képességű talajmintákra, ezért ezek a becslések a pedotranszfer szabály (PTSZ) típusú becslésekhez sorolhatók.

Arra az esetre, ha a víztartó képesség becsléséhez folytonos talajtulajdonságok állnak rendelkezésünkre, pl: mechanikai összetétel, szerves anyag tartalom, stb., folytonos pedotranszfer függvényeket (PTF) dolgoztam ki. Módszerként az erre Magyarországon is elterjedt (Rajkai, 1988) lépésenkénti (stepwise) lineáris regressziós vizsgálatokat használtam. Ezen becselő modellek továbbá alkalmasak a fa becselő függvényekkel kapott eredményekkel történő összehasonlító vizsgálatokra is, vagyis annak felmérésére, hogy mennyiben módosul a víztartó képesség becslésének pontossága és megbízhatósága, ha a víztartó képesség és a talajtulajdonságok közötti kapcsolatokat más módon próbáljuk leírni (lásd később: klasszifikációs fák). Tehát a lineáris regressziós módszer egyrészt kiegészíti a talajvíztartó képesség becselő modellek sorát, másrészt az előzőekben elkészített modellek érvényességéhez is támpontot nyújt.

A pontbecslő pedotranszfer függvényeket főtípusonként (tehát külön minden talajcsoportra) és szívéerőnként dolgoztam ki.

Végül az A és B szinteket figyelembe vevő pedotranszfer függvényeket (LR) és a folytonos talajtulajdonságok és altípus alapján becselő regressziós fákat (CRT) a talajcsoportok kialakítása nélkül (az adatok összevonásával) is kidolgoztam. Ezzel vizsgáltam, hogy az adatok előzetes csoportosítása valóban javítja-e a becslés pontosságát és megbízhatóságát.

A kitűzött vizsgálatok elvégzéséhez a rendelkezésemre álló SPSS 13.0 statisztikai szoftverben (<http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/spssstat/v20r0m0/index.jsp>), adataink típusából adódóan (víztartó képesség mint folytonos függő változó; talajjellemzők mint kategórikus – ordinális és nomiális – független változók) a CHAID, az Exhaustive CHAID

és a CRT módszerek közül választhattam². Az Exhaustive CHAID a CHAID továbbfejlesztése, de ennek a részleteit nem elemzem, mert a tapasztalatok azt mutatják, hogy ugyanazon problémafelvetés esetén ugyanazon a fastruktúrához vezet, mint a CHAID módszer, viszont lényegesen számítás igényesebb (Hámori, 2001). Ezen indokok miatt e módszer alkalmazását elvetettem. A tárgyalt előnyök miatt a CHAID és a CRT módszereket találtam a legmegfelelőbbnek a becselő módszerek kidolgozásához.

3.2.2.2. CHAID döntési fa alkalmazása a talajvízgazdálkodási modellfejlesztésben

A CHAID típusú döntési fát Kass (1980) dolgozta ki kategória típusú függő változó és bármilyen típusú magyarázó változók közötti kapcsolat leírására. Az algoritmus a függő és független változók közötti kapcsolatrendszer fastruktúrába rendezi, ami nagymértékben megkönnyíti az eredmények kiértékelését. A fák szintjei mutatják, hogy mely változóknak van a legnagyobb elkülönítő erejük. A módszer az adatbázist úgy csoportosítja, hogy a függő változó varianciája a csoportokon belül minél nagyobb, a csoportok között pedig minél kisebb legyen. A statisztikai eljárás részletesebb leírását Kass (1980) és Hámori (2001) munkája, valamint az SPSS interneten elérhető algoritmus magyarázata alapján készítettem (<http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/spssstat/v20r0m0/index.jsp>).

Annak vizsgálata, hogy a független változók kategóriáinak átlag y (függő változó) értékei hasonlóan tekinthetők-e, Pearson-féle khí-négyzet teszttel történik. Innen kapta a módszer a nevét. A módszert később továbbfejlesztették, amely már lehetővé tette, hogy bármilyen mérési skálájú és eloszlású függő és független változót képes legyen kezelni az eljárás. Amennyiben folytonos a független változó, akkor a módszer a khí-négyzet helyett F-tesztet alkalmaz (Hámori, 2001).

A dolgozatban az adott mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességet folytonos értékként vizsgálom, tehát a függő változó folytonos. A magyarázó (független) változók a talajtérképeken feltüntetett talajtulajdonságok, tehát kategóriák (1-8. melléklet).

A CHAID típusú döntési fa felépítése három fő lépésből áll: összevonás, felosztás és megállás. Az **összevonás** során a módszer minden független változó (talajtulajdonságok, pl: szerves anyag, fizikai féleség, stb.) esetén egyesíti a függő változó (adott mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség) szempontjából statisztikailag legkevésbé különböző kategóriákat. A kategóriapárok összevonhatóságának vizsgálatát F-teszt segítségével végzi az eljárás. Az F-teszt megvizsgálja, hogy az adott talajtulajdonság kategóriáihoz tartozó víztartó képesség értékek átlaga hasonlóan tekinthetők-e, miközben kiszámítja a p -értéket kategória páronként. Minél magasabb a kategória párokra számított p -érték, annál kevésbé hasonló a két kategória egymástól. A módszer kiválasztja a legmagasabb p -értékkel rendelkező kategória párokat és abban az esetben összevonja, ha azok p -értéke magasabb, mint az előzetesen beállított α összevonási kritérium. Így az adott talajtulajdonság kategóriáinak száma eggyel csökken és az összevonási lehetőségek vizsgálata újra indul. Az összevonás vizsgálata akkor áll le, ha a legmagasabb p -értékkel rendelkező kategóriapárok p -értéke kisebb, egyenlő az α összevonási kritériumnál. Az összevonás vizsgálatát a módszer elvégzi az összes független változó (talajtulajdonság) esetén. A lehetséges összevonások elvégzése után a CHAID végül kiszámítja a p -értéket az új összevont kategória rendszerű független változókra (talajtulajdonságokra). Ekkor következik a felosztás.

² A QUEST (Quick, Unbiased, Efficient Statistical Tree) típusú döntési fa csak abban az esetben alkalmazható, ha a függő változó nomális (SPSS, 2004).

A **felosztás** során a módszer kiválasztja azt a független változót (talajtulajdonságot), aminek a legkisebb a p-értéke, tehát a függő változó (víztartó képesség) szempontjából legkevésbé független magyarázó változót (talajtulajdonságot). Ha ennek p-értéke kisebb, mint az előre meghatározott α felosztás értéke, akkor a módszer felosztja az adatbázist a kiválasztott magyarázó változó (talajtulajdonság) összevonások utáni kategóriái szerint. A felosztás utáni részadatbázisok eredményezik a fastruktúra következő szintjét. Ekkor újraindul az összevonhatóság, majd felosztás vizsgálata, de már külön-külön minden részadatbázisra a fent ismertetett módon.

Az összevonás és felosztás ciklusai mindaddig folytatódnak, amíg a modell el nem ér egy **megállási** kritériumig, melyek a következők lehetnek:

- a legkevésbé különböző magyarázó változó p-értéke nagyobb, mint a meghatározott α felosztás értéke;
- a részadatbázis minden esete ugyanazon értékkel rendelkezik a függő változót tekintve;
- a részadatbázis minden esete ugyanazon értékkel rendelkezik a független változót tekintve;
- a fa szintjeinek száma eléri az előre meghatározott maximális értéket;
- a felosztandó részadatbázis esetszáma nem éri el az előre meghatározott „elágazás minimum esetszámát”;
- a további felosztás során olyan részadatbázis keletkezne, aminek az esetszáma nem éri el az előre meghatározott „végső csomópont minimum esetszámot”.

A módszer nagy előnye, hogy mind a függő, mind a független változó mérési skálája bármilyen típusú lehet – tehát a változó lehet folytonos, ordinális, nominális -, és még azok eloszlásával kapcsolatban sincs semmilyen feltétel.

Az adatbázison belüli homogénebb alcsoportok kialakítása azonban ahhoz is vezethet, hogy a kidolgozott modell túlságosan adatspecifikus lesz, ami „nem csak az alappopuláció jellemzőit, hanem a mintában előforduló véletlen sajátosságokat is modellezi” (Bodon, 2010). Ezt a folyamatot nevezik túlillesztésnek, vagy túltanulásnak (*overfitting*). A túlillesztést a döntési fa optimalizálásával lehet megakadályozni.

A klasszifikációs fák optimalizálását – a CHAID majd a későbbiekben a CRT vizsgálatok esetében szintén – kereszt-validálással végeztem el. Az optimalizálási lehetőségek közül – melyek főbb típusait Pachepsky és Schaap (2004) tekinti át – azt a típusú v-szeres kereszt-validálást alkalmaztam³, ami random módon az adatbázist nagyjából tíz egyenlő részre osztja fel, ez a tízszeres kereszt-validálás (*tenfold crossvalidation*). Az eljárás a becslési bizonytalanság alapján módosítja a fa alakját, majd a folyamat végén egy – az előre meghatározott feltételeknek megfelelő – optimalizált fát eredményez, amit a teljes becslő adatbázis alapján épít fel. A kidolgozott fát a tíz egyenlő részre felosztott aladatbázisokon alkalmazza és megadja a becslő módszer becslési bizonytalanságát mind a teljes

³ Azért alkalmaztam ezt a módszert - Breiman et al. (1998) javaslatát követve -, mert kisebb adatbázis esetén (az SPSS 13.0 programcsomag funkciói alapján) a „v-szeres kereszt-validáció” kívül csak egyszeri felosztású keresztvalidációra van lehetőségünk, amit viszont nagyobb adatbázisok esetén célszerű alkalmazni.

adatbázisra, mind a validáló adatbázisokra (ezek átlagos becslési bizonytalanságát). A vizsgálat során számolt „becslési bizonytalanság” (*risk estimate*) az átlagos négyzetes eltérésnek felel meg, mivel a függő változónk folytonos (regresszió típusú probléma).

Az SPSS 13.0 CHAID eljárásában a fa mérete következő főbb módokon befolyásolható:

- a) az összevonás és a felosztás szignifikancia szintjének meghatározásával,
- b) a szintek maximális számának a meghatározásával (a kiépítendő fában),
- c) a csomópont (*parent node*) és végső csoport (*child node*) minimális esetszámának meghatározásával.

A kategóriák összevonásának és az adatok felosztásának a vizsgálatát 0,01; 0,05 és 0,1 szignifikancia szinteken teszteltem a szikes talajokon. A keresztvalidálással képzett, legkevésbé túlillesztett modellt az 5%-os szignifikancia szint kritériummal végzett vizsgálat eredményezte, és az ugyanezzel a feltétellel képzett modellek írják le legjobban az adatok varianciáját is. Ezért a modellfejlesztés során a kategóriák összevonásához és az adatok felosztásához szükséges analíziseket 0,05 szignifikancia szintre állítottam be. A statisztikai vizsgálatok során legtöbbször ezt a szignifikancia szintet (Hill és Lewicki, 2006) használják.

A fa szintjeinek számát nem korlátoztam, hogy csak a minimum esetszámok határozzák meg a fa bonyolultságát. A megfelelő modell kiválasztásához a csomópontok és végső csoportok minimum elemszámát változtattam meg, a nagyobb esetszámoktól (csomópont esetszáma: minimum 120, végső csoport minimum esetszáma: minimum 60) a kisebbek felé haladva (csomópont esetszáma: minimum 10, végső csoport minimum esetszáma: minimum 5). A nagyobb minimum esetszámok értelemszerűen kisebb, egyszerűbb fákat eredményeznek, amik a minimum esetszám csökkentésével válnak egyre terebélyesebbé, nagyobbá.

Az optimális (nem túlillesztett) modell helyes kiválasztásának érdekében (csökkentve a véletlenszerű felosztásból származó félrevezető eredményeket) a kereszt-validálást tízszer végeztem el azon modellbeállítások esetén, amelyeknél a kereszt-validált adatokra számított átlagos négyzetes eltérés közel állt egymáshoz. Tehát a program tízszeres kereszt-validációját tízszer futtattam le, ami 10 x 10, tehát százszoros kereszt-validációt eredményezett ugyanazon modell beállítás mellett. Azt a modellbeállítást tekintettem optimálisnak, ami a legkisebb átlagos négyzetes eltérést eredményezte a százszorosan kereszt-validált adatbázisrészekre (Hill és Lewicki, 2006).

Az optimális klasszifikációs fákat (mind a CHAID, mind a CRT esetén) az adatok random kiválasztott 90%-án dolgoztam ki (becslő adatbázis) a már említett tízszeres kereszt-validálással. Az elkülönített 10%-on (teszt adatbázis) pedig megvizsgáltam a becslési megbízhatóságukat. A klasszifikációs fákra kapott pontosság (amit a becslő adatbázisra számoltam) és megbízhatóság (amit a teszt adatbázison vizsgáltam) így összevethető volt a lineáris regresszióval történő becslés pontosságával és megbízhatóságával, hiszen azt is ugyanazon a 90%-on dolgoztam ki, és ugyanazon az elkülönített 10%-on teszteltem.

3.2.2.3. Modellépítés konvencionális eljárások szerint I: klasszifikációs és regressziós fa (CRT)

A regressziós fák (CRT) bináris döntéseket alkalmaznak, tehát mindig kétfelé tudnak ágazni. A módszer lényege, hogy az értékelés során arra törekszik, hogy a csoportokon belül

csökkentse a függő változó varianciáját. Az eljárás leírását az SPSS interneten elérhető algoritmus magyarázata alapján készítettem (<http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/spssstat/v20r0m0/index.jsp>), részletesebb magyarázat Breiman és munkatársai (1998) munkájában található.

A regressziós fa módszer első lépésben minden független változó (talajtulajdonság) esetén megvizsgálja, hogy hogyan lehet az adatokat úgy ketté választani, hogy azzal az adatokkal a függő változó szempontjából a legjobban homogenizáljuk. Az eljárás minden lehetséges felosztást megvizsgál. Amennyiben a függő változónak (víztartó képességnek) k db különböző értéke van, $k-1$ a lehetséges felosztások száma. A legjobb felosztást a módszer a legkisebb négyzetek módszere alapján választja ki, mivel a függő változó, vagyis a víztartó képesség folytonos.

A következő lépésben kiválasztásra kerül az a független változó (talajtulajdonság), aminek a legjobb felosztása a legkisebb négyzetes eltérést eredményezi. A regressziós fa az első szinten az adatbázist e szerint különíti el. Az adatok kétfelé osztása után a független változók szerinti legjobb felosztás keresésétől újra indul a folyamat.

A feljebb ismertetett CHAID módszerhez hasonlóan (3.2.2.2. fejezet) a felosztási ciklusok addig tartanak, amíg a modell el nem ér egy **megállási** kritériumot, melyek a következők lehetnek:

- a részadatbázis minden esete ugyanazon értékkel rendelkezik a függő változót tekintve;
- a részadatbázis minden esete ugyanazon értékkel rendelkezik független változót tekintve;
- a fa szintjeinek száma eléri az előre meghatározott maximális értéket;
- a felosztandó részadatbázis esetszáma nem éri el az előre meghatározott „elágazás minimum esetszámát”;
- a további felosztás során olyan részadatbázis keletkezne, aminek az esetszáma nem éri el az előre meghatározott „végső csomópont minimum esetszámát”;
- a legjobb felosztás kisebb javulást eredményez a becslésben az előre meghatározott értéknél.

A kategóriák összevonásához és az adatok felosztásához szükséges analíziseket 0,05 szignifikancia szintre állítottam be (ahogy a CHAID módszernél is).

A regressziós fa optimalizálását a CHAID módszernél ismertetett tízszer lefuttatott tízszeres kereszt-validálással végeztem. A fa alakját csak az elágazás és a végső csomópont minimum esetszámainak változtatásával befolyásoltam.

A bináris felosztásból is következik, hogy a CRT módszerrel készített modellek mélyebb fákat eredményezhetnek, amik hajlamosabbak lehetnek a túlillesztésre. Folytonos független változók esetén viszont alkalmasabbak az összefüggések vizsgálatára, mint a CHAID. A CHAID módszer a folytonos független változókat ugyanis ordinális változókká alakítja át (SPSS, 2004), mégpedig úgy, hogy az elkülönített kategóriák hasonló esetszámmal rendelkezzenek. Ez gyakran olyan kategóriákat eredményez, melyek talajtani szempontból nehezen értelmezhetők, sőt akár félrevezetőek is lehetnek (és nem is használatosak).

Mind a négy talajcsoport esetén elemeztem, hogy kategória változók esetén a CRT, vagy a CHAID módszer alkalmazása a megfelelőbb. Megvizsgáltam, hogy a regressziós (CRT) fával kapott legoptimálisabb (tehát nem túlillesztett) becslő modellnek milyenek az eredményei a CHAID fához viszonyítva.

3.2.2.4. Modellépítés konvencionális eljárások szerint II: Többszörös lineáris regresszió

A kizárólag folytonos talajtulajdonságok alapján víztartó képességet becslő pedotranszfer függvények kidolgozásához többszörös lineáris lépésenkénti (*stepwise forward*) regressziót (LR) használtam (<http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/spssstat/v20r0m0/index.jsp>). Az LR módszer elsőként azt a független változót építi be a modellbe, amelyik a legnagyobb determinációs együtthatóval rendelkezik, majd a kevésbé szignifikánsakat. A további változók hozzáadása közben mindig ellenőrzi, hogy esetleg melyik változót lehetne kivenni a modellből a determinációs koefficiens (R^2) szignifikáns csökkentése nélkül. Ez az F-próba alapján történik.

Az LR, a CRT és CHAID eljárásokkal kidolgozott modelleket összevetve (a) a kizárólag kategória adatok, (b) a kategória adatok és folytonos adatok, valamint (c) a kizárólag folytonos adatok alapján történő becslési eljárások pontossága és megbízhatósága közötti különbség is meghatározható volt.

A korábban hasonló módszerrel kidolgozott pedotranszfer függvényeket (pl. Rajkai, 1988, Rawls et al., 2003) két okból sem tudtam felhasználni. Egyrészt a korábbi LR alapú modellek bemenő adatai különböztek az általam felhasznált adatoktól, a talajtérképeken feltüntetett talajjellemzők adataitól. Másrészt, a legtöbb ilyen PTF nem ad becslést a higroszkópos víztartalomra, amit mindhárom eljárással becsültem.

A modell paramétereit Rajkai (1988), Wösten et al. (1999) és Hodnett és Tomasella (2002) munkájával analóg módon határoztam meg, a 22. sz. egyenletben leírtaknak megfelelően:

$$\Theta_i = b_i + b_{i,1} \cdot \text{agyag} + \dots + b_{i,j} \cdot \text{CaCO}_3 + b_{i,j+1} \cdot \text{pH}^{-1} + b_{i,j+k} \cdot \text{só}^2 + \dots + b_{i,n} \cdot \ln(\text{humusz}) \quad (22)$$

ahol Θ_i a víztartó képesség az adott mátrixpotenciálnál ($i = -0,1, -33, -1500$ és -150000 kPa mátrixpotenciál).

Mivel az adatbázisban kalcium-karbonát és sómentes minták is szerepeltek 0 értékkel ezekre a jellemzőkre, ami a logaritmikus és reciprokok transzformált formák értelmezését nem teszi lehetővé, ezért ezek képzését nem végeztem el.

A többszörös lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvényeket az adatok 90%-át tartalmazó becslő adatbázison dolgoztam ki. A becslések megbízhatóságát pedig az adatok fennmaradó 10%-án, a teszt adatbázison vizsgáltam.

A következő pontbecslő pedotranszfer függvényeket dolgoztam ki:

- 1) LR1: A, B és C szintekre kidolgozott egyenletek, független változói azon talajtulajdonságok, melyek a nagyméretarányú talajtérképeken fel vannak tüntetve, de azokat folytonos értékekkel jellemzik,

2) LR2: A, B és C szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1 módszer beviteli paraméterein kívül a térfogattömeget is figyelembe vevő becslő módszer,

3) LR1_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, független változói azon talajtulajdonságok, melyek a nagyméretarányú talajtérképeken fel vannak tüntetve, de azokat folytonos értékekkel jellemzik,

4) LR2_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a térfogattömeget is figyelembe vevő becslő módszer.

Az A és B szintek alapján becslő pedotranszfer függvényeket a talajcsoportok összevonásával, tehát az adatbázis előzetes csoportosítása nélkül is elvégeztem a következő módon:

5) LR1_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, független változói azon talajtulajdonságok, melyek a nagyméretarányú talajtérképeken fel vannak tüntetve, de azokat folytonos értékekkel jellemzik,

6) LR2_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a térfogattömeget is figyelembe vevő becslő módszer,

7) LR3_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdoldhatóság-tartalmat is figyelembe vevő becslő módszer,

8) LR4_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR2_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdoldhatóság-tartalmat is figyelembe vevő becslő módszer.

A talajcsoportok kialakításával kidolgozott pedotranszfer függvények becslési pontosságát és hatékonyságát összehasonlítottam a csoportosítás nélkül, az összes talajra kidolgozott folytonos pedotranszfer függvényekével.

3.2.2.5. A becslő módszerek pontosságának és megbízhatóságának vizsgálata

A különböző módszerek által kidolgozott víztartó képesség becslő modellek összehasonlítását azok pontossági és megbízhatósági értékei alapján végeztem el.

Az alábbi mutatókat használtam a pontosság és megbízhatóság megítéléséhez.

- I. Klasszifikációs fák (CHAID és CRT) esetén:
 - a) Pontosság megítéléséhez: átlagos négyzetes hiba gyöke (RMSE), Pearson-féle korrelációs együttható és a keresztvalidált RMSE érték.
 - b) Megbízhatóság megítéléséhez: átlagos hiba (ME), átlagos relatív hiba (RME), RMSE érték és Pearson-féle korrelációs együttható.
- II. Többszörös lineáris regresszió esetén:
 - c) Pontosság megítéléséhez: ME, RMSE, RME, Pearson-féle korrelációs együttható, és módosított R^2 érték.
 - d) Megbízhatóság megítéléséhez: ME, RMSE, RME és Pearson-féle korrelációs együttható.

A speciális mutatókat (RMSE, ME és RME) az alábbi képletek alapján számoltam.

Átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke: (RMSE) ((23) egyenlet)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (23)$$

ahol: y_i : a mért érték; $\hat{y}_i$: az y becsült érték; N : mintaelemszám,
 átlagos hiba (ME, (24) egyenlet),

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)}{N} \quad (24)$$

átlagos relatív hiba (RME, (25) egyenlet)

$$RME = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}}{N}. \quad (25)$$

Kiszámítottam még a becsült és mért víztartó képesség értékek közötti Pearson-féle korrelációt és a determinációs koefficiens (http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/spssstat/v20r0m0/index.jsp) is. Az átlagos hibát (ME) a klasszifikációs fák esetén a becsülő adatbázisra nem számoltam, mert a klasszifikációs fa módszer erre a hibaértékre optimalizál, így az mindig 0 értéket ad.

A különböző módszerek pontossága, illetve megbízhatósága közötti eltéréseket 5%-os szignifikancia szinten vizsgáltam. Az összehasonlítást mindig a minták négyzetes eltérése (SE, (26) egyenlet):

$$SE = (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (26)$$

alapján végeztem. Két különböző becsülő módszer becslési hibájának (a vizsgált mintákra számolt SE-értékeit) hasonlóságát az SPSS 13.0 One-Way ANOVA (*Homogeneity of Variance Test*) módszerével vizsgáltam, kettőnél több módszer esetén pedig a Duncan teszttel.

A kidolgozott becsülő módszerek – pedotranszfer szabályok és pedotranszfer függvények – becslési pontosságát a becsülő adatbázison (~90%), megbízhatóságát a teszt adatbázison (~10%) ellenőriztem.

A különböző becslési eljárások – a pedotranszfer szabályok és a pedotranszfer függvények – eredményeit a becslési pontosság (a becsülő adatbázison számolt becslési hibák) és megbízhatóság (a teszt adatbázisra számolt becslési hibák) alapján hasonlítottam össze. Az eredményeket táblázatos formában szöveges értékeléssel mutatom be. A víztartó képesség becslését kategória értékek és az altípus figyelembe vételével a regressziós fával és a CHAID típusú fával is kidolgoztam a szikes talajcsoport esetén. Ezzel az elemzéssel vizsgáltam, hogy a módszertani különbségek mekkora hatással vannak a becslés pontosságára és megbízhatóságára.

A 3.10 és 3.11. táblázatban összefoglalom a dolgozatban bemutatott becslési eljárásokat.

3.10. Táblázat. A jellegzetes hazai talaj fő típusokra (szikesek, barna erdőtalajok, csernozjom talajok és réti talajok) kidolgozott módszerek és azok input paraméterei.

Módszer név	A becslésnél használt független változók jellemzői
<i>CHAID típusú klasszifikációs fa</i>	
CHAID1	<u>kategória típusúak</u> , melyek a térképi kódoknak felelnek meg: altípus, szerves anyag tartalom, fizikai féleség, pH, kalcium-karbonát tartalom és vízdoldhatóság-tartalom kategóriái (csak a szikes talajcsoportra).
CHAID2	<u>kategória típusúak</u> , melyek a térképi kódoknak felelnek meg: altípus, szerves anyag tartalom, fizikai féleség, pH, kalcium-karbonát tartalom kategóriái, valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetését (barna erdőtalajokra, csernozjom és réti talajokra).
<i>CRT: regressziós fa</i>	
CRT1	<u>folytonos típusúak</u> ; az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %), vízdoldhatóság-tartalmat (tömeg %) és pH _{H2O} -t tartalmazza (csak a szikes talajcsoportra).
CRT2	<u>folytonos és kategória típusúak</u> ; a CHAID1 modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus kivételével - folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %), vízdoldhatóság-tartalmat (tömeg %) és pH _{H2O} -t (csak a szikes talajcsoportra).
CRT3	<u>folytonos és kategória típusúak</u> ; a CHAID2 modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus és az altalaj és feltalaj kategóriáinak kivételével - folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát tartalmat (tömeg %) és pH _{H2O} -t (barna erdőtalajokra, csernozjom és réti talajokra).
CRT_kat	<u>kategória típusúak</u> , melyek a térképi kódoknak felelnek meg: altípus, humusztartalom, fizikai féleség, pH, kalcium-karbonát tartalom, feltalaj és altalaj megkülönböztetése (szikes talajoknál vízdoldhatóság-tartalom kategóriái is, de a feltalaj és altalaj megkülönböztetése nélkül).
<i>LR: többszörös lineáris regresszióval kidolgozott PTF</i>	
LR1	<u>folytonos típusúak</u> ; A, B és C szintekre kidolgozott egyenletek, az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) és pH _{H2O} -t tartalmazza. Szikes talajoknál a vízdoldhatóság-tartalmat is (tömeg %).
LR2	<u>folytonos típusúak</u> ; A, B és C szintekre kidolgozott egyenletek, az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) tartalmat, pH _{H2O} -t és térfogattömeget (g cm ⁻³) tartalmazza. Szikes talajoknál a vízdoldhatóság-tartalmat is (tömeg %).
LR1_AB	<u>folytonos típusúak</u> ; A és B szintekre kidolgozott egyenletek, független változóként az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát tartalmat (tömeg %) és pH _{H2O} -t tartalmazza (barna erdőtalajokra, csernozjom és réti talajokra).
LR2_AB	<u>folytonos típusúak</u> ; A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a térfogattömeget is figyelembe veszi (barna erdőtalajokra, csernozjom és réti talajokra).
LR3_AB	<u>folytonos típusúak</u> ; A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdoldhatóság-tartalmat is figyelembe veszi (csak a szikes talajcsoportra).
LR4_AB	<u>folytonos típusúak</u> ; A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR2_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdoldhatóság-tartalmat is figyelembe veszi (csak a szikesekre).

3.11. táblázat. A csoportok kialakítása nélkül (az adatok összevonásával) kidolgozott módszerek és azok input paraméterei

Módszer név	A becslésnél használt független változók jellemzői
<i>CRT: regressziós fa</i>	
CRT (sóval)	<u>folytonos és kategória típusúak</u> ; agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalom (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %), vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %), pH _{H2O} és a talaj altípusa.
CRT (só nélkül)	<u>folytonos és kategória típusúak</u> ; agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalom (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %), pH _{H2O} feltalaj és altalaj megkülönböztetése és a talaj altípusa.
<i>LR: többszörös lineáris regresszióval kidolgozott PTF</i>	
LR1_AB	<u>folytonos típusúak</u> ; A és B szintekre kidolgozott egyenletek, független változóként az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) tartalmat és pH _{H2O} -t tartalmazza.
LR2_AB	<u>folytonos típusúak</u> ; A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a térfogattömeget is figyelembe vevő becslő módszer
LR3_AB	<u>folytonos típusúak</u> ; A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdoldhatóság-tartalmat is figyelembe vevő becslő módszer.
LR4_AB	<u>folytonos típusúak</u> ; A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR2_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdoldhatóság-tartalmat is figyelembe vevő becslő módszer

4. Eredmények

4.1. Az előzetes vizsgálatok eredményei

A kutatási munka első lépéseként végzett faktoranalízist a MARTHA 1.0-ás verziójú adatbázis összes mintáját felhasználva végeztem. Kilenc talajjellemző összefüggéseit vizsgáltam, első lépésben az adatbázis összes adatára, majd egy főtípus (a csernozjom) adatai szerinti csoport jellemzőire.

4.1.1. Nagy talajváltozatosság alapján végzett faktoranalízis eredménye

A teljes mintaadatbázis elemzésekor kilenc változóból három faktort képeztem, mivel azok az összes varianciát igen jól, 78,22%-ban magyarázzák. Az I. faktor (FI) a megfigyelési változók varianciájáról 49,66%-ban szolgáltat információt, a II. faktor (FII) 18,61%-ban, a III. faktor (FIII) pedig 9,95%-ban (4.1. táblázat).

4.1. táblázat. A faktoranalízis eredménye a teljes adatbázisra. A 0,4-nél kisebb (abszolút értékben számolva) faktorsúly értékek nincsenek feltüntetve a táblázatban.

Változók	FI	FII	FIII	Kommunalitás
Homok tartalom	-0,85	-	-	0,82
Agyag tartalom	0,92	-	-	0,88
Kalcium-karbonát tartalom	-	0,89	-	0,81
Szerves anyag tartalom	-	-	0,81	0,75
pH _(H2O)	-	0,85	-	0,73
Víztartó képesség pF0 értéken	-	-	0,71	0,66
Víztartó képesség pF 2,5 értéken	0,87	-	-	0,84
Víztartó képesség pF 4,2 értéken	0,88	-	-	0,81
Víztartó képesség pF 6,2 értéken	0,85	-	-	0,77
Variancia %	49,66	18,61	9,95	
Kumulált variancia %	49,66	68,27	78,22	

A 4.1. táblázatban láthatók az elforgatott faktorok súlyok, a kommunalitás értékek, a magyarázott variancia és a kumulált variancia értékek. A különböző faktorok eltérő súllyal befolyásolhatják ugyanazon X megfigyelési változó alakulását, valamint ugyanazon faktor is eltérő súllyal befolyásolhatja a különböző X változók alakulását. A kommunalitás érték a közös faktorok súlyainak négyzetösszegével egyenlő, mely kifejezi, hogy az X_i változó összes varianciájának (s_i^2) mekkora részét okozzák a közös faktorok. A kumulált variancia megmutatja, hogy mekkora a különböző faktorok együttes részvétele a megfigyelési változók varianciájában (Sváb, 1979). A faktorok értékelése a faktor súlyok négyzet értéke alapján történt.

Az FI a homok tartalom varianciáját $(-0,854^2) = 73\%$ -ban magyarázza, az agyagtartalomét $(0,923^2) = 85\%$ -ban, a -33 kPa mátrixpotenciál értékhez tartozó víztartó képességét $(0,870^2) = 76\%$ -ban, a -1500 kPa mátrixpotenciál értékhez tartozó víztartó képességét $(0,882^2) = 78\%$ -ban és a -150000 kPa mátrixpotenciál értékhez tartozó víztartó képességét $(0,848^2) = 72\%$ -ban. Az FII a kalcium-karbonát tartalom varianciájának $(0,892^2) = 80\%$ -át, a pH varianciájának $(0,849^2) = 72\%$ -át jellemzi. Az FIII a szerves anyag tartalom

variációját ($0,814^2$) = 66%-ban magyarázza, a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességét pedig ($0,707^2$) = 50%-ban. A -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciál értékeihez tartozó víztartó képesség, valamint a talaj agyag tartalma pozitív, míg a homok tartalom negatív kapcsolatban áll az FI-el, kommunalitás értékeik 0,80 körüliek, így a főkomponenssúlyok jelentősnek tekinthetők (4.1. táblázat). Ezen talajtulajdonságokat ugyanazon háttérváltozó befolyásolja. Ez alátámasztja, hogy a mechanikai összetétel és a magasabb tenziótartományban mért víztartó képesség értékek erős kapcsolatot mutatnak egymással. A kalcium-karbonát tartalom és a pH az FII-hez, a szerves anyag tartalom és a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség az FIII-hoz tartoznak. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az elemzés során a kalcium-karbonát tartalom és a pH nem mutat szignifikáns hatást a talaj víztartó képességére, azok egy a víztartó képességtől független háttérváltozóval állnak kapcsolatban. A -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség kapcsolatot mutat a talaj szerves anyag tartalmával (igaz, hogy kommunalitás értéke éppen megfelelő, a három faktor együttesen 66%-ban magyarázza ezen változó variációját), ami arra a korábban már sokak által megállapított tényre utal, hogy a telített-közeli állapotban a térfogattömeg által – ami szoros kapcsolatban áll a talaj szerves anyag tartalmával – jellemezhető összporozitás befolyásolja, hogy mennyi nedvességet képes a talaj tárolni (Várallyay, 2002b).

4.1.2. Egyazon főtípusba tartozó talajok faktoranalízisének eredménye

Az adatbázis egy szűkebb adatcsoportján végzett elemzésekhez a csernozjom főtípushoz tartozó mintákat választottam ki. A vizsgálatához használt MARTHA 1.0 adatbázis 733 db csernozjom talajmintát tartalmazott. Ezen minták vizsgálata során is három faktort tudtam képezni a kilenc változóból, amelyek a megfigyelési változók variációját 74,57%-ban magyarázzák. Az I. faktor (FI) az összes variációról 43,34%-ban, a II. faktor (FII) 20,83%-ban, a III. faktor (FIII) pedig 10,30%-ban szolgáltat információt, a kommunalitás értékek az összes változó esetén megfelelőek (4.2. táblázat). Az FI a homok tartalom variációját ($-0,770^2$) = 59%-ban magyarázza, az agyagtartalomét ($0,855^2$) = 73%-ban, a -33 kPa mátrixpotenciál értékhez tartozó víztartó képességét ($0,864^2$) = 75%-ban, a -1500 kPa mátrixpotenciál értékhez tartozó víztartó képességét ($0,817^2$) = 67%-ban és a -150000 kPa mátrixpotenciál értékhez tartozó víztartó képességét ($0,856^2$) = 73%-ban. Az FII a kalcium-karbonát tartalom variációjának ($0,782^2$) = 61%-át, szerves anyag tartalom variációjának ($-0,800^2$) = 64%-át, a pH variációjának pedig a ($0,816^2$) = 67%-át jellemzi. Az FIII a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség variációját ($0,900^2$) = 81%-ban magyarázza. A teljes adatbázis vizsgálati eredményeihez hasonlóan, a -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciál értékeihez tartozó víztartó képesség, valamint a talaj agyag tartalma pozitív, míg a homok tartalom negatív kapcsolatban áll az FI-el (4.2. táblázat), ezen megfigyelési változókat ugyanazon háttérváltozó befolyásolja.

4.2. táblázat. A csernozjom talajok faktoranalízisének eredménye. A 0,4-nél kisebb (abszolút értékben számolva) faktorsúly értékeket nem tüntettük fel a táblázatban.

Változók	FI	FII	FIII	Kommunalitás
Homok tartalom	-0,77	-	-	0,70
Agyag tartalom	0,86	-	-	0,74
Kalcium-karbonát tartalom	-	0,78	-	0,75
Szerves anyag tartalom	-	-0,80	-	0,71
pH _(H2O)	-	0,82	-	0,71
Víztartó képesség -0,1 kPa mátrixpotenciál értéken	-	-	0,90	0,86
Víztartó képesség -33 kPa mátrixpotenciál értéken	0,86	-	-	0,79
Víztartó képesség -1500 kPa mátrixpotenciál értéken	0,82	-	-	0,68
Víztartó képesség -150000 kPa mátrixpotenciál értéken	0,86	-	-	0,78
Variancia %	43,34	20,83	10,30	
Kumulált variancia %	43,34	64,27	74,57	

A csernozjom talajok esetén a teljes adatbázissal ellentétben a kalcium-karbonát és a pH mellett a szerves anyag tartalom is az FII-höz tartoznak. A -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség pedig mindkét főkomponenstől független, kommunalitás értéke igen magas, így az elemzés elég jól jellemzi ezen megfigyelési változót. A vizsgálat alapján a pH, a szerves anyag tartalom és a kalcium karbonát tartalom kisebb hatással van a talaj víztartó képességére, mivel külön faktorhoz tartoznak. A vizsgálat alapján a szerves anyag tartalom negatív kapcsolatban áll a talaj kalcium-karbonát tartalmával és pH-jával, ez azzal magyarázható, hogy a csernozjom talajok humusztartalma felülről lefelé fokozatosan csökken, míg a pH ugyanebben az irányban kis mértékben nő a növekvő mésztartalom hatására. Ezen talajtípus hazánkban legtöbbször löszön alakul ki, így a talaj legalsó szintje a legmeszesebb, leglúgosabb és a legkisebb humusztartalmú. A -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség egyetlen változóval sem mutatott kapcsolatot.

Az eredmények alátámasztják, hogy a víztelítettségénél magasabb tenziótartományban a víztartó képességet becsülő módszert érdemes lenne a talaj mechanikai összetételére alapozva, a szerves anyag szerepét megfontolva kidolgozni. A -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslésének kidolgozásához további vizsgálatok szükségesek, mivel a megfigyelt változók közül egyedül a szerves anyag tartalommal mutatott kapcsolatot, az összes mintát figyelembe vevő vizsgálat során. A csernozjom talajok esetén viszont a pF0 külön faktorba került.

A faktoranalízis eredményei utaltak arra, hogy a becslést segítené, ha a módszerek kidolgozása talajtípusonként (főtípusonként) történne, mivel a vizsgált talajtulajdonságok és a víztartó képesség kapcsolata főtípusonként eltérő lehet, amit a csernozjom talajok vizsgálati eredményeinek összevetése a teljes adatbázis alapján kapott eredményekkel önmagában is alátámaszt.

4.2. A módszerfejlesztés eredményei a szikes talajok példáján

4.2.1. Klasszifikációs fa módszerek (CRT és CHAID) eredményei

Az optimalizált klasszifikációs fa modellek

A fák optimalizálását az anyag és módszer fejezetben leírtak szerint (3.2.2.2. fejezet) végeztem el mind a regressziós (CRT1, CRT2), mind a CHAID típusú fák kidolgozása esetén.

Az optimális modellbeállítás kiválasztását (a nem túlillesztett CRT és CHAID fákat) minden talajcsoport és minden víztartó képesség érték becslés esetén a 4.3. táblázathoz hasonló eredményösszegző táblázatok alapján végeztem el. Példaként a szikes talajcsoport -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslésére kidolgozott különböző modellbeállítású regressziós fák eredményeit mutatom be.

4.3. táblázat. Egy modell optimalizálást jellemző példa, mely a szikes talajcsoport -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslésére kidolgozott, különböző modellbeállítású regressziós fák legfontosabb jellemzőit és a modellek átlagos négyzetes hibáit (MSE) mutatja. A modell a kategóriák és az altípus alapján becsül.

Csomópont minimum esetszáma	Végső csoport minimum esetszáma	Végső csoportok száma	MSE (átlagos négyzetes hiba) az adatok 100%-ára (tf%)	A tízszer elvégzett tízszeres keresztvalidáció MSE értékeinek átlaga (tf%)
120	60	3	41,849	43,130*
100	50	5	33,565	42,585*
80	40	5	33,565	35,398*
60	30	8	30,919	36,301*
50	25	8	30,919	35,960*
40	20	12	29,760	34,893
30	15	13	29,558	34,454†
20	10	21	28,243	35,608
10	5	39	23,328	36,759*

*Ezen modellbeállítások egyértelműen rosszabb MSE értékeket adtak, ezért ezeknél csak egyszer futtattam le a tízszeres keresztvalidációt.

† A legkisebb négyzetes hibát eredményező modellbeállítás, tehát a vizsgált beállítások közül a legoptimálisabb.

A kereszt-validált adatokra az átlagos négyzetes hiba a csomópont és a végső csoport minimum esetszámának csökkentésével (a fa egyre elágazóbb lesz) egy ideig csökken, majd egy bizonyos pont után emelkedik, a modell ebben a szakaszban válik túlillesztetté. A túlillesztett szakaszban a tanuló adatbázist egyre jobban, már szinte tökéletesen leírja a fa (lásd MSE az adatok 100%-ra oszlopot a 4.3. táblázatban), viszont a kereszt-validált adatokra egyre nagyobb becslési hibát eredményez. Tehát a modell ebben a szakaszban adatfüggő, újabb adatok víztartó képességének becslésére már nem alkalmazható. Azt a modellbeállítást tekintetem optimálisnak, ami a legkisebb négyzetes hibát eredményezte a tízszer elvégzett tízszeres kereszt-validáció során. Az adott víztartó képesség becslésére ezen modellbeállítással kidolgozott fát fogadtam el végső becselő módszernek.

A 4.4. táblázatban látható az optimális minimum esetszám a csomópontot és végső csoportot tekintve. Az optimális esetszámok a megfigyelt víztartó képességenként, módszerenként és figyelembe vett talajtulajdonságonként is különböznek.

4.4. táblázat. A fa modellek optimális minimum esetszámai a csomópontban és a végső csoportokban a legkevésbé túlillesztett modellek esetén (tízszor elvégzett tízszeres kereszt-validálás módszerrel).

Módszer	Víztartó képesség								Hasznosítható	
	-0,1 kPa		-33 kPa		-1500 kPa		-150000 kPa		vízkészlet	
	CS	V	CS	V	CS	V	CS	V	CS	V
CRT 1 (folytonos változók)	20	10	40	20	20	10	30	15	40	20
CRT 2 (folytonos változók és altípus)	20	10	30	15	50	25	20	10	30	15
CRT_kat (kategória változók)	30	15	30	15	20	10	20	10	60	30
CHAID 1 (kategória változók)	50	25	60	30	60	30	60	30	50	25

CS: csomópont minimum esetszáma.

V: végső csoport minimum esetszáma.

A szikes talajok esetén az összes becslő módszer kidolgozásánál figyelembe vettem a genetikai C szinteket is, mert a magas sótartalom ebben a szintben is jelen lehet.

Azon talajtulajdonságok, amiket a kidolgozott regressziós (CRT) és CHAID típusú fák a víztartó képesség becsléséhez figyelembe vesznek, a 4.5. táblázatban láthatók. A talajtulajdonságok és a víztartó képesség közötti összefüggések magyarázatát az 4.3.1.2. fejezetben foglaltam össze. A következő bekezdésekben részletezem a szikes talajokra kidolgozott becslő módszereket.

CRT1 folytonos értékekre: homok, por és agyag frakció, szervesanyag, kalcium-karbonát és só tartalom, valamint pH.

-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Az agyagtartalomtól kívül minden tulajdonságot figyelembe vesz a modell a víztartó képesség becsléséhez (11. melléklet). Először a szerves anyag tartalom alapján osztja ketté az adatokat. A magasabb szerves anyag tartalom kedvez a víztartó képességnek. Az alacsony szerves anyag tartalmú mintákat a por tartalmuk alapján osztja tovább. Az alacsony szerves anyag és portartalmú talajoknál a vízzoldhatóság-tartalmat és a pH-t veszi figyelembe a homogén csoportok kialakításakor. Az alacsony szerves anyag és magas por tartalom esetén viszont a kalcium-karbonát és a homoktartalom fontos az elkülönítéshez. A 0,38%-nál nagyobb szerves anyag tartalmú mintákat a homok és a portartalmuk alapján osztja ketté.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A mechanikai összetételt és a kalcium-karbonát tartalmat veszi figyelembe a modell (12. melléklet). A módszer az első szinten a homoktartalom alapján válogatja szét az adatokat. Az alacsonyabb homoktartalmú talajokat ($\leq 31,5\%$) az agyagtartalom, a magasabbakat ($> 31,5\%$) a homoktartalom alapján csoportosítja tovább. Az alacsonyabb homok és magas agyagtartalmú talajokat ($> 40,7\%$) a kalcium-karbonát tartalom szerint különbözteti meg. A 10,9%-nál magasabb kalcium-karbonát tartalom esetén csökken a talajok víztartó képessége. Alacsony homok és agyagtartalom esetén ismét a homok, majd a por és kalcium-karbonát tartalom a meghatározó.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A modell a mechanikai összetétel, a kalcium-karbonát és szerves anyag tartalom alapján osztja homogénebb csoportokra az adatbázist (13. melléklet). Először az agyagtartalom

alapján különíti el a mintákat. Az alacsonyabb agyagtartalmú mintákat ($\leq 31,4\%$) a homok, agyag és szerves anyag tartalom alapján csoportosítja tovább, a magasabb agyagtartalmúakat ($> 31,4\%$) pedig az agyag, kalcium-karbonát és portartalom alapján. $31,4-43,8\%$ agyagtartalom esetén már a $14,1\%$ -nál nagyobb kalcium-karbonát tartalom is negatív hatással van a víztartó képességre, $43,8\%$ agyagtartalom felett viszont $23,5\%$ kalcium karbonát tartalom feletti értékek eredményeznek kisebb víztartó képességet. A $69,3\%$ -nál több homokot tartalmazó talajok esetén egyedül a homoktartalom a meghatározó, minél nagyobb a homoktartalom, annál kisebb a víztartó képesség. A szerves anyag tartalom mennyiségét csak abban az esetben veszi figyelembe a modell a csoportok kialakításakor, ha az agyagtartalom $\leq 26\%$ és a homoktartalom $45,4-69,3\%$ között van (tehát homokos vályog, vályog fizikai féleség esetén).

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A regressziós fa a mechanikai összetétel, a kalcium-karbonát tartalom, a szerves anyag tartalom, valamint a pH figyelembe vételével homogenizálja az adatbázist (14. melléklet). Először az agyagtartalom alapján osztja ketté az adatbázist. A fa második szintjén a $31,7\%$ -nál kisebb agyagtartalmú talajok esetén a szerves anyag tartalom, $31,7\%$ -nál nagyobb agyagtartalom esetén pedig a kalcium-karbonát tartalom alapján tesz különbséget a minták víztartó képessége szempontjából. $2,1\%$ -nál kisebb szerves anyag esetén az agyag, homok és kalcium-karbonát tartalom alapján történik a további elkülönítés. A magasabb agyagtartalmú minták esetén ($> 31,7\%$) a harmadik szinten az agyag- és portartalom, negyedik szinten $37,1-46,3\%$ agyagtartalom esetén ismét az agyagtartalom, majd az ötödik szinten $37,1-37,7\%$ agyagtartalomnál a pH alapján különíti el a csoportokat.

Hasznosítható vízkészlet

Az első szinten, a portartalom alapján osztja két csoportra az adatbázist a módszer. A további elkülönítés a pH, szerves anyag tartalom és agyagtartalom alapján történik (15. melléklet).

CRT2: folytonos értékek és altípus alapján

-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A talajtípus becslésbe történő bevonásakor is első szinten a szerves anyag tartalom osztja ketté az adatbázist, viszont $0,4\%$ fölötti szerves anyag tartalom esetén már az altípus alapján választja szét az adatokat a regressziós fa. Alacsonyabb szerves anyag tartalom esetén (16. melléklet) az alsóbb szintek kialakításánál a por, vízdoldhatóság-tartalom és az altípus a meghatározók.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Az altípus figyelembe vételénél is a homoktartalom a legfontosabb talajtulajdonság a víztartó képesség becsléséhez. A $31,5\%$ -nál magasabb homoktartalmú talajok esetén a csoportok kialakításakor csak a homoktartalmat veszi figyelembe a modell (17. melléklet, 2. és 6. csomópontok). A $31,5\%$ -nál kisebb homoktartalom esetén viszont a második szinten az altípus alapján osztja ketté az adatokat, majd a pH, agyag, homok, portartalom, kalcium-karbonát tartalom és altípus alapján alakítja a csoportokat.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Első szinten az agyagtartalom alapján választja ketté az adatbázist a regressziós fa módszer. A 31,38%-nál kevesebb, vagy egyenlő agyagot tartalmazó talajokat a homoktartalom alapján csoportosítja tovább. A magas (>69,30%) homoktartalmú mintákat nem osztja további csoportokra (18. melléklet, 4. csomópont), a többi viszont az agyag, homoktartalmuk, altípusuk, szerves anyag tartalmuk és homoktartalmuk alapján tovább csoportosítja. A 31,38%-nál magasabb agyagtartalmúakat az altípus, a kalcium-karbonát tartalom és ismét az altípus alapján különíti el.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Ahogy a -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom becslése esetén, ezen a mátrixpotenciálon is az agyagtartalom az első talajtulajdonság, amit figyelembe véve két csoportra osztható szét az adatbázis (19. melléklet, 1. és 2. csomópont). Az alacsonyabb agyagtartalmú mintákat ($\leq 31,73\%$) a szerves anyag tartalmuk, agyagtartalmuk, altípusuk, kalcium-karbonát tartalmuk és ismét az agyagtartalmuk alapján kerülnek különböző csoportokba a fa különböző szintjein, felülről lefelé haladva. Magasabb agyagtartalomnál (>31,73%) a kalcium-karbonát, agyagtartalom, altípus, szerves anyag tartalom, portartalom, ismét altípus és homoktartalom alapján különíti el a mintákat a módszer felülről lefelé haladva 7 szinten.

Hasznosítható vízkészlet

Első szinten az altípus alapján választja ketté a mintákat a módszer (20. melléklet). A további elkülönítés altípustól függően a vízzoldhatóság-tartalom, portartalom alapján történik a második szinten, majd az altípus, homoktartalom, szerves anyag tartalom, agyagtartalom és újra az altípus alapján.

CHAID1: kategóriák és altípus alapján*-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom*

Első szinten a fizikai féleség alapján osztja 4 csoportra az adatbázist (21. melléklet). A durva homok és homok fizikai féleségű talajokat egy csoporttá vonja össze és nem osztja tovább egyéb talajtulajdonságok alapján. A homokos vályog és vályog talajokat szintén egy csoportba teszi, majd a második szinten pH értékük, a harmadik szinten pedig az altípusuk alapján különíti el a talajokat. A 9-nél nagyobb pH-jú talajok víztartó képessége kisebb. A harmadik fizikai féleség csoportot az agyagos vályog és a vályogos agyag alkotja. Ezt a csoportot a minták szervesanyag-tartalma alapján választja ketté, majd az alacsony szerves anyag tartalmúakat ($\leq 1\%$) a kalcium-karbonát tartalmuk alapján további két csoportra különíti el. Az 1%-nál több szerves anyagot tartalmazó talajoknak nagyobb a víztartó képességük. A 25%-nál több kalcium-karbonát tartalommal rendelkező minták víztartó képessége kisebb, mint a 25%-nál kisebb egyenlő kalcium-karbonát tartalmúaké. Végül pedig az agyag és nehéz agyag fizikai féleségű talajok alkotják a negyedik fő csoportot, ahol a minták sótartalma alapján tesz további megkülönböztetést a módszer. 0,25%-nál nagyobb sótartalom kisebb víztartó képességet eredményez. Az alacsonyabb sótartalmú mintákat a modell további két csoportra különíti el a pH érték alapján. Itt a homokos vályog és vályog talajokhoz hasonlóan a 9-es pH-nál lúgosabb talajok víztartó képessége alacsonyabb.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Az első szinten ismét a fizikai féleség a meghatározó a csoportok kialakításakor (22. melléklet). Az első csoportot ezen a mátrixpotenciálon is a durva homok és homok talajok képezik, további felbontás nélkül. A második csoportot a homokos vályog fizikai féleségű talajok alkotják, itt sincs további csoportképzés. A harmadik csoport tartalmazza a vályog és agyagos vályog talajokat, amiket a második szinten az altípus, harmadik szinten pedig a fizikai féleség alapján csoportosít tovább. A negyedik csoportba tartoznak az agyag, az ötödikbe a nehéz agyag talajok. Mindkét csoport esetén a még az altípus alapján osztja három, illetve kettő további csoportra a talajokat.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Az első szinten ismét a fizikai féleség alapján különíti el a talajokat hat darab csoportra (23. melléklet). Az első a durva homok és homok talajok, a másodikat a homokos vályogok, a harmadikat a vályog talajok alkotják. Ezen csoportokat nem osztja tovább a módszer. A negyedik csoportot az agyagos vályog talajok képezik, ez a csoport a kalcium-karbonát tartalom alapján kerül további elkülönítésre, 10% feletti kalcium-karbonát tartalom kisebb víztartó képességet eredményez. Az ötödik csoportba tartoznak az agyag talajok, melyeket szintén a kalcium-karbonát tartalmuk alapján különböztet meg a módszer ugyanúgy, mint az agyagos vályog talajok esetén. A hatodik csoport tartalmazza a nehéz agyag fizikai féleségű talajokat, amiket további két csoportra oszt fel a módszer az altípusuk alapján.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A klasszifikációs fa csak a fizikai féleséget és a kalcium-karbonát tartalmat veszi figyelembe a becslés során (24. melléklet). A durva homok és a homok kerül az első csoportba, a vályogos homok a másodikba, ezek a csoportok nem kerülnek további csoportosításra. A vályog, agyagos vályog, agyag és nehéz agyag fizikai féleségű talajokat külön csoportokba rendezi a módszer és mindet továbbosztja a kalcium-karbonát tartalmuk alapján. A magas kalcium-karbonát tartalom alacsonyabb víztartó képességet eredményez.

Hasznosítható vízkészlet

A klasszifikációs fa az altípus és a fizikai féleség alapján csoportosítja a talajokat (25. melléklet). Az első szinten az altípus alapján osztja 3 csoportra a mintákat, majd a második szinten egy altípus csoport esetén veszi figyelembe a fizikai féleséget.

A kategóriák alapján kidolgozott regressziós fa esetén a víztartó képesség és a talajtulajdonságok kapcsolata hasonló a CHAID módszernél bemutatotthoz. Ezért a regressziós fával kidolgozott módszert nem írom le részletesebben. A fa szerkezete azonban más (26-30. melléklet), ami az eltérő fa építő algoritmusból adódik (3.2.2.2. és 3.2.2.3. fejezetek).

4.5. táblázat. A döntési fákkal (CHAID és CRT) kidolgozott pedotranszfer szabályok összefoglaló jellemzői.

Becslés típusa	Becsült tulajdonság	A becsléshez figyelembe vett input paraméterek	Elkülönített csoportok száma
CRT1 (folytonos változók)	-0,1 kPa	szerves anyag, por, homok, só, kalcium-karbonát, pH	10
	-33 kPa	homok, agyag, kalcium-karbonát, por	10
	-1500 kPa	agyag, homok, kalcium-karbonát, por, szerves anyag	12
	-150000 kPa	agyag, szerves anyag, kalcium-karbonát, por, homok, pH	11
	DV	por, pH, szerves anyag, agyag	7
CRT2 (folytonos változók és altípus)	-0,1 kPa	szerves anyag, por, altípus, só	8
	-33 kPa	homok, altípus, pH, agyag, kalcium-karbonát, por	14
	-1500 kPa	agyag, homok, altípus, kalcium-karbonát, szerves anyag	12
	-150000 kPa	agyag, szerves anyag, kalcium-karbonát, altípus, por, só homok	16
	DV	altípus, só, por, homok, szerves anyag, agyag	9
CHAID1 (kategória változók és altípus)	-0,1 kPa	fizikai féleség, pH, szerves anyag, só, altípus, kalcium-karbonát kód	11
	-33 kPa	fizikai féleség, altípus kód	10
	-1500 kPa	fizikai féleség, kalcium-karbonát, altípus kód	9
	-150000 kPa	fizikai féleség, kalcium-karbonát kód	11
	DV	altípus, fizikai féleség	5
CRT_kat (kategória változók és altípus)	-0,1 kPa	fizikai féleség, altípus, pH, szerves anyag, kalcium-karbonát kód	15
	-33 kPa	fizikai féleség, altípus, pH, szerves anyag kód	13
	-1500 kPa	fizikai féleség, altípus, szerves anyag, kalcium-karbonát, só, pH kód	22
	-150000 kPa	fizikai féleség, altípus, szerves anyag, kalcium-karbonát, só, pH kód	20
	DV	altípus, pH, szerves anyag, fizikai féleség kód	7

CHAID1, CRT_kat: független változói kategória típusúak, melyek a térképi kódoknak felelnek meg, tartalmazva a talaj altípusát. A talajtérképi kódok jelentése talajtulajdonságokként az 1-4. és 5. (humusz) mellékletekben látható. CRT1: független változóként az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) tartalmat, pH_{H2O} és sótartalmat tartalmazza. CRT2: független változóként a CHAID modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus kivételével – folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %), vízzoldhatóság-tartalmat és pH_{H2O}-t.

4.2.2. Pedotranszfer függvények többszörös lineáris regresszióval (LR)

A szikes talajok lineáris regresszióval történő víztartó képesség becsléséhez a mechanikai összetételén és a humusztartalomon kívül fontos még a kalcium-karbonát, vízdoldhatóság-tartalom és a pH is (4.6. és 4.7. táblázat). Az agyag, homok és kalcium-karbonát tartalom mind a négy mátrixpotenciálon szignifikáns független változó a becselő modellben. A szerves anyag (humusz) tartalom a -0,1 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom és a hasznosítható vízkészlet (DV) becslésénél szignifikáns független változó, a másik három mátrixpotenciálon nem szükséges a víztartó képesség becsléséhez. A pH-t szintén csak a -0,1 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom és a hasznosítható vízkészlet becsléséhez veszi figyelembe a modell.

4.6. táblázat. Folytonos pedotranszfer függvények a -0,1, -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékek és a diszponibilis víz (DV) becsléséhez azon talajtulajdonságok alapján, amik hasonlóak a részletes talajtéreképeken található talajtulajdonságokhoz, de azokat folytonos értékekkel jellemzik (LR1).

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 11,559 - 0,319 \cdot \text{homok} + 1,103 \cdot \ln(\text{humusz}) - 0,753 \cdot \text{pH}^2 + 24,057 \cdot \text{agyag}^{-1} + 12,410 \cdot \text{pH} - 0,001 \cdot \text{CaCO}_3^2 - 0,005 \cdot \text{agyag-por} - 0,001 \cdot \text{por}^2$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 44,479 - 0,302 \cdot \text{homok} + 0,003 \cdot \text{agyag}^2 - 0,002 \cdot \text{CaCO}_3^2 - 0,005 \cdot \text{agyag-por} + 4,401 \cdot \text{só}$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 18,738 + 0,346 \cdot \text{agyag} - 0,002 \cdot \text{CaCO}_3^2 - 0,001 \cdot \text{homok}^2 - 2,513 \cdot \ln(\text{agyag})$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 2,539 + 0,081 \cdot \text{agyag} - 0,049 \cdot \text{CaCO}_3 - 0,011 \cdot \text{homok} - 0,875 \cdot \text{homok}^{-1} - 0,001 \cdot \text{agyag} \cdot \text{homok}$$

$$\text{DV} = 15,584 + 0,080 \cdot \text{por} - 1,352 \cdot \ln(\text{humusz}) - 0,077 \cdot \text{pH}^2 + 4,109 \cdot \text{só}^2$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %), pH_{H2O} és vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %).

A -150000 kPa-hoz tartozó víztartó képesség becsléséhez a vizsgált minták esetén nem volt szignifikáns változó a térfogattömeg, ezért arra ugyanazt a becselő egyenletet kaptuk, mint az LR1 függvények esetén. A térfogattömeg becslésbe történő bevonásával változnak a becselő függvények független változói (4.6. és 4.7. táblázat). A -0,1 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becsléséhez kidolgozott regressziós egyenlet egyszerűbb. -33 kPa esetén a humusztartalom is szignifikáns független változó. -1500 kPa-on a becslés nem tartalmazza a homoktartalmat. A hasznosítható vízkészlet becsléséhez pedig a homok tartalom is szükséges, a homok és por tartalom szorzataként.

4.7. táblázat. A térfogattömeget is figyelembe vevő folytonos pedotranszfer függvények (LR2).

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 65,975 - 9,285 \cdot \text{térfogattömeg}^2 - 0,041 \cdot \text{homok} + 0,001 \cdot \text{por}^2 + 3,364 \cdot \text{só}^2$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = -22,195 - 0,303 \cdot \text{homok} + 29,046 \cdot \text{térfogattömeg}^{-1} + 4,937 \cdot \text{só} - 0,002 \cdot \text{CaCO}_3^2 - 0,856 \cdot \text{humusz} - 0,006 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} + 0,213 \cdot \text{agyag} + 15,123 \cdot \text{agyag}^{-1}$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 9,657 + 0,421 \cdot \text{agyag} - 2,648 \cdot \text{térfogattömeg}^2 + 0,002 \cdot \text{por}^2 - 0,002 \cdot \text{CaCO}_3^2 - 0,003 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} + 0,040 \cdot \text{pH}^2$$

$$\text{DV} = 1,670 + 17,624 \cdot \text{térfogattömeg}^{-1} + 0,001 \cdot \text{por}^2 - 1,495 \cdot \ln(\text{humusz}) + 4,898 \cdot \text{só}^2 + 0,001 \cdot \text{homok} \cdot \text{por} - 0,049 \cdot \text{pH}^2$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), térfogattömeg (g cm⁻³) szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %), pH_{H2O}, vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %) és térfogattömeg (g cm⁻³).

A 4.8. és 4.9. táblázatok tartalmazzák a kidolgozott pedotranszfer függvények becslését jellemző mutatókat. A módosított R² kifejezi, hogy a modellben szereplő magyarázó (független) változók együttesen hány %-ban határozzák meg az eredményváltozó varianciáját (<http://www.tankonyvtar.hu/statisztika/biostatisztika-080904-71>).

4.8. táblázat. A többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becslő modellek (LR1 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{8,630} = 39,601	p < 0,0005	0,326
Víztartó képesség -33 kPa-on	F _{5,633} = 102,293	p < 0,0005	0,443
Víztartó képesség -1500 kPa-on	F _{4,634} = 179,892	p < 0,0005	0,529
Víztartó képesség -150000 kPa-on	F _{5,633} = 193,896	p < 0,0005	0,602
Hozzáférhető víz	F _{4,634} = 13,453	p < 0,0005	0,078

4.9. táblázat. A térfogattömeget is figyelembe vevő többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becslő modellek (LR2 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{5,633} = 252,625	p < 0,0005	0,664
Víztartó képesség -33 kPa-on	F _{8,630} = 86,221	p < 0,0005	0,517
Víztartó képesség -1500 kPa-on	F _{6,632} = 130,186	p < 0,0005	0,549
Víztartó képesség -150000 kPa-on†	-	-	-
Hozzáférhető víz	F _{6,632} = 16,098	p < 0,0005	0,133

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

A módosított R² értékek alapján látható (4.8. és 4.9. táblázat), hogy a térfogattömeget is figyelembe vevő módszerek jobban jellemzik az adatok varianciáját – a -150000 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becslése kivételével. Főként a -0,1 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becslés pontosságát és megbízhatóságát javítja nagyban, ahol a mért és becsült értékek közötti Pearson-féle korrelációs együttható 71,94%-kal nő a térfogattömeget nem tartalmazó becsléshez képest (4.10. és 4.11. táblázat). A hasznosítható vízkészlet R² értéke nagyon alacsony, a rendelkezésre álló talajtulajdonságok alapján nagyon rosszul becsülhető.

A becslő függvények pontosságát és megbízhatóságát jellemző 4.10. és 4.11. táblázatokról látható, hogy a becslési hibák csökkennek a térfogattömeg figyelembe vételével, ugyanakkor a validálás során a hasznosítható víz (DV) becslésénél ez a javító hatás már kisebb mértékű, becslése így is bizonytalan.

4.10. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési pontossága (a becslési hibák számítása a becslő adatbázisra) a különböző mátrixpotenciálokon

Becsülő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési pontosságot jellemző statisztikai hibák	$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	DV	Mintaszám
LR1	folytonosak	ME (tf%)	0,008	0,000	0,013	-0,008	0,000	653 [§]
		RME (%)	-1,11	-3,62	-10,57	-19,17	-21,11	
		RMSE (tf%)	4,902	5,838	4,745	1,325	5,153	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,590**	0,669**	0,742**	0,787**	0,280**	
LR2	folytonosak és térfogattömeg	ME (tf%)	0,000	0,000	0,011	†	0,000	653
		RME (%)	-0,53	-3,13	-11,05	†	-19,76	
		RMSE (tf%)	3,493	5,424	4,610	†	5,000	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,816**	0,723**	0,753**	†	0,364**	

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) pH_{H2O} és vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %) valamint térfogattömeg az LR2 modell esetén.

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

§Azon PTF-ek esetén, ahol a sótartalom is szignifikáns független változó, 639 minta alapján dolgoztam ki a becslő módszert (LR1 $\theta_{-33 \text{ kPa}}$, és LR2 $\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$, $\theta_{-33 \text{ kPa}}$), mert a többi mintára nem áll rendelkezésre mért vízdoldhatóság-tartalom érték.

4.11. táblázat A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési megbízhatósága (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra) a különböző mátrixpotenciálokon.

Becslő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési hatékonyságot jellemző statisztikai hibák	$\theta_{-0,1}$ kPa	θ_{-33} kPa	θ_{-1500} kPa	$\theta_{-150000}$ kPa	DV	Mintaszám
LR1	folytonosak	ME (tf%)	0,520	0,651	1,472	0,405	-0,461	76 ^s
		RME (%)	0,11	-1,08	-3,16	0,09	-19,11	
		RMSE (tf%)	4,684	5,855	5,274	1,350	4,056	
		Pearson féle	0,531**	0,641**	0,737**	0,764**	0,368**	
		korrelációs koefficiens						
LR2	folytonosak és térfogattömeg	ME (tf%)	-1,183	1,336	1,400	†	-0,479	76
		RME (%)	-2,83	1,67	-1,12	†	-18,28	
		RMSE (tf%)	2,502	5,119	4,792	†	4,062	
		Pearson féle	0,913**	0,757**	0,793**	†	0,374**	
		korrelációs koefficiens						

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %), pH_{H2O} és vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %), valamint térfogattömeg az LR2 modell esetén.

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

§Azon PTF-ek esetén, ahol a sótartalom is szignifikáns független változó, 75 mintán ellenőriztem a becslés megbízhatóságát (LR1 $\theta_{-33\text{kPa}}$, és LR2 $\theta_{-0,1\text{kPa}}$, $\theta_{-33\text{kPa}}$), mert a többi mintára nem áll rendelkezésre mért vízdoldhatóság-tartalom érték.

Az A és B szintek alapján (574 db mintára) kidolgozott pedotranszfer függvények a 31. és 32. mellékletben láthatók. Ezeket a becslő egyenleteket hasonlítottam össze a csoportosítás nélkül kidolgozott folytonos pedotranszfer függvényekkel a 4.4.1. fejezetben.

4.2.3. A módszerek összehasonlítása

Annak számszerűsítését, hogy mennyiben változik a becslés pontossága és megbízhatósága attól függően, hogy **folytonos, vagy kategória** értékeket tartalmaz a CRT2 és CRT_kat módszer eredményeinek összevetésével mutatom be. A **lineáris regresszió és a fa módszerek összehasonlítását** az LR1 és a CRT1 módszerek eredményeinek elemzésével mutatom be, az **altípus** becslésben betöltött szerepét pedig a CRT1 és CRT2 módszerek összehasonlításával. A **klasszifikációs eljárások módszertani különbségeinek** a becslési pontosságra és megbízhatóságra gyakorolt hatását a CRT_kat és a CHAID módszerek egymáshoz hasonlításával vizsgáltam. A módszerek közötti különbségek szignifikancia vizsgálatának eredményeit a 33-42. mellékletek mutatják.

4.2.3.1. Folytonos és kategória értékek

A 4.12. táblázat mutatja be a becslő módszerek pontosságát. Látható, hogy a -33 és -150000 kPa mátrixpotenciálokon a CRT2 módszerrel – ami folytonos értékek alapján becsli a víztartó képességet –, a -0,1 és -1500 kPa-on a kategória adatok és altípus alapján becslő regressziós fával írható le pontosabban a talajok víztartó képessége. A kereszt-validált

adatokra számított hibaértékek azonban mutatják, hogy a becslés robosztusabb a kategóriák alapján. A megbízhatóság vizsgálata során pedig már a kategóriák és az altípus alapján becslő regressziós fa a megbízhatóbb (4.13. táblázat), igaz a különbségek nem szignifikánsak (38-42. mellékletek). Erre az adhat magyarázatot, hogy a klasszifikációs fa eljárás során a becslés egy talajtulajdonság kombináció eredménye, amelyben a pár %-os eltérések (ami a kategóriákra jellemző) nem befolyásolják a becsült értéket.

4.12. táblázat. A különböző módszerekkel kidolgozott modellek pontossága (a becslési hibák számítása a becslő adatbázisra) különböző mátrixpotenciálokon.

Becslő módszer	Becsült tulajdonság	Becslő adatbázis		Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintaszám
		Tanuló adatok	Kereszt-validált adatok		
		RMSE (tf%)	RMSE ^a (tf%)		
CRT1 (folytonos változók)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,756	5,401	0,622**	653
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,612	6,287	0,718**	653
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,484	5,051	0,773**	653
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,272	1,427	0,805**	653
	DV becsült	4,946	5,311	0,386**	653
	DV számított ^b	5,174	-	0,338**	653
CRT2 (folytonos változók és altípus)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,797	5,411	0,613**	653
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,127	5,857	0,772**	653
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,415	5,046	0,781**	653
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,175	1,458	0,837**	653
	DV becsült	4,734	5,236	0,266**	653
	DV számított ^b	4,869	-	0,468**	653
CHAID1 (kategória változók és altípus)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,760	5,189	0,621**	653
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,489	5,840	0,733**	653
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,641	4,772	0,755**	653
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,434	1,502	0,744**	653
	DV becsült	4,973	5,156	0,510**	653
	DV számított ^b	5,044	-	0,416**	653
CRT_kat (kategória változók és altípus)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,664	5,254	0,640**	653
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,437	5,870	0,738**	653
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,184	4,845	0,806**	653
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,275	1,475	0,804**	653
	DV becsült	4,950	5,170	0,384**	653
	DV számított ^b	5,146	-	0,358**	653
LR1 (folytonos változók)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,902	-	0,590**	653
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,837	-	0,669**	639 ^c
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,745	-	0,742**	653
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,325	-	0,787**	653
	DV becsült	5,153	-	0,280**	639 ^c
	DV számított ^b	5,242	-	0,222**	639 ^c

*A korreláció 0,05 szignifikancia szinten megbízható.

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becsült víztartó képességekből számolva.

^cA -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom és a hasznosítható vízkészlet (DV) becsléséhez szignifikáns input paraméter a sótartalom, ami 639 db mintára áll rendelkezésre.

Kategória típusú független változók: fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát, pH és sótartalom kód. Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) pH_{H2O} és vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %).

4.13. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott klasszifikációs fák (pedotranszfer szabályok) és lineáris regresszió (pedotranszfer függvény) becslési megbízhatósága (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra).

Módszer	Becsült tulajdonság	Teszt adatbázis			Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintasza
		ME (tf%)	RMSE (tf%)	RME (%)		
CRT1 (folytonos változók)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,851	4,701	-2,85	0,541**	76
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	1,445	6,440	1,44	0,578**	76
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	1,501	5,433	-0,69	0,711**	76
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,120	1,369	-12,27	0,730**	76
	DV becsült	-0,645	4,503	122,05	0,186	76
	DV számított ^b	-0,056	4,826	-13,56	0,284**	76
CRT2 (folytonos változók és altípus)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,418	4,767	-1,83	0,522**	76
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,914	5,264	0,52	0,731**	76
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	1,102	5,266	-2,77	0,719**	76
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,197	1,509	-10,93	0,671**	76
	DV becsült	-0,254	4,442	-16,52	0,236*	76
	DV számított ^b	-0,188	4,604	-11,99	0,427**	76
CHAID1 (kategória változók és altípus)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,322	4,222	-1,47	0,643**	76
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	1,117	5,040	1,05	0,760**	76
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	1,357	5,163	-2,66	0,740**	76
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,221	1,265	-9,12	0,782**	76
	DV becsült	-0,092	4,493	-16,82	0,091	76
	DV számított ^b	-0,240	4,580	-17,19	0,185	76
CRT_kat (kategória változók és altípus)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,333	4,488	-1,54	0,588**	76
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	1,089	4,935	0,98	0,772**	76
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	1,082	5,117	-4,08	0,738**	76
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,150	1,249	-7,95	0,787**	76
	DV becsült	-0,054	4,327	-15,13	0,228*	76
	DV számított ^b	0,007	4,734	-15,59	0,181	76
LR1 (folytonos változók)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	0,520	4,684	0,11	0,531**	76
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,651	5,855	-1,08	0,641**	75 ^c
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	1,472	5,274	-3,16	0,737**	76
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,405	1,350	0,09	0,764**	76
	DV becsült	-0,461	4,056	-23,38	0,368**	75 ^c
	DV számított ^b	-0,899	4,402	-19,11	0,211	75 ^c

*A korreláció 0,05 szignifikancia szinten megbízható.

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

^aA tízszer kereszt-validált validáló adatbázisrészecskék átlagos négyzetes hibáinak gyöke, amit a CRT és CHAID módszerekre végeztem el.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becsült víztartó képességekből számolva.

^cA -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom és a hasznosítható vízkészlet (DV) becslési megbízhatóságát 75 db mintán vizsgáltuk, mert ezen értékekhez szükséges a sótartalom ismerete, ami az említett mintaszámra áll rendelkezésre.

Kategória típusú független változók: fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát, pH és sótartalom kód.

4.2.3.2. Többszörös lineáris regresszió (LR) és regressziós fa (CRT)

Bár a becslő adatbázison a Pearson-féle korrelációs együttható alapján a regressziós fa módszer (CRT1) becslési pontossága volt jobb, a teszt adatbázis vizsgálata során összességében a lineáris regresszióval történő becslés volt a megbízhatóbb (4.12. és 4.13. táblázat). Ez alól a -0,1 kPa-hoz tartozó víztartó képesség becslése és a hozzáférhető víztartalom számítása volt kivétel. A validálás során a CRT1 és LR1 módszerek átlagos négyzetes eltérés értékei közötti különbség szignifikánsan nem különbözik egymástól se a pontosság, se a megbízhatóság vizsgálata során (33-42. mellékletek).

4.2.3.3. Az altípus szerepe

Az altípus becslésben betöltött szerepét a CRT1 és CRT2 módszerek eredményeinek összevetésével vizsgáltam. A becslés pontosságának vizsgálata során a -0,1 kPa mátrixpotenciál kivételével a víztartó képesség és hasznosítható vízkészlet becslése javult az altípus figyelembe vételekor (CRT2), de a különbségek nem szignifikánsak (33-37. mellékletek). A -33kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség (szabadföldi vízkapacitás) becslése és a hasznosítható vízkészlet számítása esetén volt a legnagyobb a különbség a két módszer között. Az altípus bevonásával, a -33 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom esetén, az átlagos négyzetes hiba gyöke (RMSE) 18%-kal csökkent, a Pearson-féle korreláció pedig 26 %-kal nőtt a becslés megbízhatóságának vizsgálatakor (4.13. táblázat). A különbség azonban ebben az esetben sem szignifikáns a négyzetes eltéréseket vizsgálva (39. melléklet). A számított hasznosítható vízkészlet RMSE értéke csak 5%-kal csökkent, viszont a mért és becsült értékek közötti Pearson-féle korreláció 50%-kal nőtt a becslés megbízhatóságának vizsgálata során. Az altípus becslésbe történő bevonása -1500 kPa mátrixpotenciálra is javítja a víztartó képesség becslésének megbízhatóságát, igaz, nem szignifikánsan (40. melléklet). A -150000 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becslési megbízhatósága azonban az altípus bevonásával romlott: 1,369 tf% RMSE értékről 1,509-re.

Összegezve a felfebb részletezett tapasztalatokat és figyelembe véve, hogy a -0,1 és -1500 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó nedvességtartalmak esetén a becslés pontossága és megbízhatósága hasonló volt az RMSE és Pearson-féle korrelációs koeficienseket tekintve, megállapítható, hogy a talaj altípusát érdemes figyelembe venni a becslés során.

4.2.3.4. Regressziós fa (CRT) és CHAID típusú fa

A regressziós fával kidolgozott becslés pontossága – 0,05 szignifikancia szinten vizsgálva a becslések négyzetes eltérését – szignifikánsan jobb, mint a CHAID módszeré a -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálok víztartó képességének becslésekor. A kereszt-validálás során viszont a CHAID kisebb RMSE (négyzetes eltérés gyöke) értéket eredményezett, de a minták négyzetes hibáit tekintve nincs szignifikáns különbség a módszerek között. A -0,1 kPa-hoz tartozó mátrixpotenciál becslésénél a legnagyobb a különbség, a CHAID módszer megbízhatóbb (a becslés RMSE értéke 0,27 tf%-kal kisebb), de a különbség itt sem szignifikáns. A CHAID módszerrel kidolgozott becslő modell struktúrája áttekinthetőbb, ezért könnyebben értelmezhető.

4.2.4. A becslő módszerek kiválasztása

Az összes vizsgált módszer közül (CRT1, CRT2, CHAID1, CRT_kat, LR1), – az LR2-t itt nem elemzem, mert a térképeken nincs információ a térfogattömegről – az altípust is figyelembe vevő folytonos értékek (CRT2) és a kategóriák (CRT_kat) alapján becslő módszerek a legpontosabbak (33-37. mellékletek). **A validálás során viszont a kategória adatok és az altípus alapján (CRT_kat és CHAID1) történő becslések a legmegbízhatóbbak.** Legjobb megbízhatóságuk már a kereszt-validálás eredményeinél is látható: a klasszifikációs fák közül a CHAID és a CRT_kat módszernél a legkisebb a különbség a tanuló és validáló adatbázisok átlagos négyzetes eltérés négyzetgyöke (RMSE) között. A különböző módszerek becslési megbízhatósága szignifikánsan nem különbözik egymástól (38-42. melléklet).

A kategória adatok és altípus alapján becsült víztartó képesség értékek becslési megbízhatósága a regressziós fa (CRT_kat) és a CHAID esetén nagyon közel volt egymáshoz (38-42. melléklet). A becslési pontosság a regressziós fa (CRT-kat) esetén szignifikánsan jobb volt a -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokon. A CHAID típusú becselő modell struktúrája viszont könnyebben áttekinthető, mint a regressziós fa módszeré, ezért az eredmények értelmezése is könnyebb. Ezen okok miatt a víztartó képesség és a hasznosítható vízkészlet becslését kategória adatok esetén a regressziós fával és a CHAID módszerrel is kidolgoztam a többi talajcsoport esetén is, de a kategóriák alapján történő becslés részletes elemzését csak a CHAID módszernél írtam le. A kategóriákra kidolgozott becselő modelleket (fákat) a többi talajcsoportnál a regressziós fa módszer (CRT_kat) esetén nem mutatom be a mellékletekben, mert többségük olyan nagy méretű, hogy akadályozza az olvasható megjelenítést.

Amennyiben folytonos értékek alapján történt a becslés – az altípus bevonása nélkül – a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom becslése a regressziós fával történő becslés (CRT1) esetén volt megbízhatóbb, a többi három vizsgált mátrixpotenciálon viszont a lineáris regresszióval becsült víztartó képesség értékek voltak a megbízhatóbbak.

A hasznosítható vízkészlet becslése akkor volt a legmegbízhatóbb, amikor a hasznosítható vízkészletet a folytonos talajtulajdonságok alapján lineáris regresszióval becsült -33 és -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó értékek alapján számítottam (42. melléklet).

A szikes talajok vizsgálatainak eredményei alapján arra a megállapításra jutottam, hogy azon szikes talajokra, melyek szerves anyag tartalmát nem tüntetik fel a nagyméretarányú térképeken, valamint a barna erdőtalajok, nem szikes csernozjomok és réti talajok víztartó képesség becslésére a továbbiakban a következő módszereket dolgozom ki:

1. a kategória adatok alapján becselő CHAID és CRT módszert, mely figyelembe veszi az altípust is;
2. a folytonos értékek és altípus alapján becselő CRT2 módszert, és
3. a többszörös lineáris regresszióval becselő módszereket (LR1, LR2).

A lineáris regresszióval történő becslés kidolgozását az az eset indokolja, amikor nem áll rendelkezésre a becsléshez az altípus.

Továbbá a klasszifikációs fák (CHAID és CRT) kidolgozásánál a C szinteket nem veszem figyelembe a modellépítés során a barna erdőtalajoknál, csernozjom talajoknál és réti talajoknál, valamint megkülönböztetem az altalajt és a feltalajt annak érdekében, hogy ezzel erősítsem az altípus nyújtotta összetett morfológiai információk becslésben betöltött szerepét. Feltalajként a 0-30 cm mélységben elhelyezkedő mintákat, illetve a szántott A szinteket vettem figyelembe. A lineáris regressziót kétféleképpen dolgozom ki: a) az A és B szintek alapján, valamint b) az A, B és C-szinteket is figyelembe véve. A C szintek elhagyását (a) eset) a klasszifikációs fák eredményeivel való összehasonlíthatóság indokolta. A C szintek figyelembe vételével (b) eset) pedig a kidolgozott regressziós egyenletek a mélyebb talajszintek ill. rétegek víztartó képességének jellemzésére is alkalmazhatók.

Mivel a szikes talajoknál a klasszifikációs fák (CHAID és CRT) esetén, a hasznosítható vízkészlet a becsült -33 és -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség értékekből számolva eredményezte a megbízhatóbb becsléseket (DV számított) a Pearson-

féle korrelációt tekintve (4.13. táblázat), a továbbiakban – a többi talajcsoport esetén – külön becslő módszert nem dolgozok ki a számítására. A barna erdőtalajok, a nem szikes csernozjomok és réti talajok esetén az említett mátrixpotenciálokhoz tartozó becsült nedvességtartalmakból számolt hasznosítható vízkészlet pontosságát és megbízhatóságát mutatom be.

4.3. Jellegzetes hazai talajok víztartó képesség becslési modelljei

4.3.1. Szikes talajok

A szikes talajok vízgazdálkodási modelljét, annak jellemző paramétereit az előző, 4.2 fejezetben mutattam be. A modellépítés eredményeinek kiegészítéseként ez a fejezet olyan becslő módszereket mutat be, amelyekhez nem szükséges a szerves anyag ismerete és a szikes talajok vízgazdálkodásában szerepet kapó talajtani tényezők ismertetését tartalmazza.

4.3.1.1. Szikes talajok víztartó képességének becslése humusztartalom nélkül

A szikes fő típusú és a szoloncsákos réti talajtípusú (ami a réti fő típusúhoz tartozik) talajok esetén, a térképeken nem tüntetik fel a szerves anyag tartalmát jellemző kódot, ezért ezen altípusok esetén olyan becslő módszereket dolgoztunk ki, amelyekhez nem szükséges a talajok humusz tartalmának ismerete. A MARTHA adatbázis 208 db szikes fő típusú vagy szoloncsákos réti típusú talajszintet tartalmaz.

Klasszifikációs fa módszerek (CRT és CHAID) eredményei

A kidolgozott regressziós (CRT) és CHAID típusú fák által a víztartó képesség becsléséhez figyelembe vett talajtulajdonságok, mátrixpotenciálonként, a 4.14. táblázatban láthatók. A következő bekezdésekben részletezem a szikes fő típusú és szolonyeces réti talajokra kidolgozott becslő módszerek főbb jellemzőit.

CRT3: folytonos értékek, altípus valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése alapján

-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Első szinten a homoktartalom alapján csoportosítja a módszer az adatokat (43. melléklet). A 20,02%-nál kisebb egyenlő homoktartalmú mintákat az agyagtartalom, pH, altípus, ismét az agyagtartalom és végül a portartalom alapján osztja további csoportokra. A 20,02 %-nál nagyobb homoktartalmú mintákat a pH, homoktartalom és altípus alapján különíti el.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Az első szinten ezen a mátrixpotenciálon is a homoktartalom osztja két részre az adatbázist (44. melléklet). A 18,32%-nál kisebb egyenlő homoktartalmú mintákat az altípus, sótartalom és agyagtartalom alapján kerül csoportosításra. A 18,32%-nál nagyobb homoktartalmúakat pedig a homoktartalom többszöri figyelembe vételével, valamint az altípus, agyagtartalom, pH és kalcium-karbonát tartalom alapján különbözteti meg.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Az agyagtartalom alapján választja ketté az adatokat (45. melléklet). A 27,86%-nál kisebb, vagy egyenlő agyagtartalmú talajokat csak a homoktartalom alapján osztja további két csoportra. A 27,86%-nál nagyobb agyagtartalmúakat az altípus, kalcium-karbonát és pH alapján különíti el.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A homoktartalom az első tulajdonság, ami alapján ketté választja az adatokat a módszer (46. melléklet). A 15,68%-nál kisebb, vagy egyenlő homoktartalmú talajokat portartalmuk, altípusuk és kalcium-karbonát tartalmuk alapján csoportosítja tovább. A 15,68%-nál nagyobb homoktartalmúaknál az agyagtartalmat, portartalmat, pH-t, homoktartalmat, altípust, kalcium-karbonát tartalmat veszi figyelembe a csoportképzésnél.

CHAID2: kategóriák, altípus valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése alapján*-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom*

Első lépésben három csoportra osztja fel az adatbázist a módszer a fizikai féleség alapján (47. melléklet). Az első csoportot a durva homok és homok fizikai féleségű talajok alkotják, amiket nem kerülnek további felosztásra. A második csoportban vannak a homokos vályog, vályog agyagos vályog fizikai féleségű talajok. Ezeket a pH-juk, altípusuk, sőtartalmuk és fizikai féleségük alapján csoportosítja tovább. A harmadik csoportban találhatók az agyag és nehéz agyag fizikai féleségű talajok, amiket szintén nem oszt további csoportokra a módszer.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Szintén a fizikai féleség alapján válogatja szét a mintákat a módszer (48. melléklet). Az első szinten négy csoportra osztja fel az adatokat: a durva homok és homok talajokra (1. csoport), a homokos vályogokra (2. csoport), a vályog és agyagos vályogokra (3. csoport), végül az agyag és nehéz agyag talajokra (4. csoport). Az első csoportban az altalajokat és a feltalajokat különbözteti meg a fa. A második csoport nem kerül további felosztásra. A harmadik csoportnál az altípus, a kalcium-karbonát és a fizikai féleség figyelembe vételével különíti el a talajokat. A negyedik csoportnál az altípus alapján tesz különbséget a minták víztartó képessége között.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Ahogy az előzőekben, ezen a mátrixpotenciálon is a fizikai féleség alapján történik a csoportosítás az első lépésben (49. melléklet). A fizikai féleség alapján öt felé választja az adatokat a módszer. Az első csoportba a durva homok és homok talajok tartoznak, amiket a pH alapján oszt további két csoportra. A második csoportba kerültek a homokos vályog talajok, a negyedikbe pedig a vályog és agyagos vályog fizikai féleségűek, ezek a csoportok nem kerülnek további felosztásra. A negyedik csoportot az agyag talajok alkotják, ezeket az altípus alapján csoportosítja tovább a módszer. Az ötödik csoportba tartoznak a nehéz agyag talajok, ezek szintén nem kerülnek további csoportosításra.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A fa alakja igen egyszerű, a módszer a fizikai féleség alapján négy csoportra különíti el a mintákat (50. melléklet). Az első csoportot a homokos vályog és annál durvább fizikai féleségű talajok alkotják, a másodikat a vályog, a harmadikat az agyagos vályog, a negyediket pedig az agyag és nehéz agyag fizikai féleségű talajok. További felosztás csak a negyedik csoportban történik, az altípus alapján.

4.14. táblázat. A döntési fákkal (CHAID és CRT2) kidolgozott pedotranszfer szabályok összefoglaló jellemzői

Becslés típusa	Becsült víztartó képesség	A becsléshez figyelembe vett input paraméterek	Elkülönített csoportok száma
CRT3	$\theta_{-0,1}$ kPa	homok, agyag, pH, altípus, por	10
	θ_{-33} kPa	homok, altípus, só, agyag, kalcium-karbonát	12
	θ_{-1500} kPa	agyag, homok, altípus, kalcium-karbonát, pH	6
	$\theta_{-150000}$ kPa	homok, por, agyag, altípus, kalcium-karbonát, pH	12
CHAID2	$\theta_{-0,1}$ kPa	fizikai féleség, pH, altípus, sótartalom kód	7
	θ_{-33} kPa	fizikai féleség, feltalaj és altalaj megkülönböztetése, altípus, kalcium karbonát tartalom kód	10
	θ_{-1500} kPa	fizikai féleség, pH, altípus kód	7
	$\theta_{-150000}$ kPa	fizikai féleség, altípus kód	5

CHAID2, CRT_kat: független változói kategória típusúak, melyek a térképi kódoknak felelnek meg, valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése. A talajtérképi kódok jelentése talajtulajdonságokként az 1-4. mellékletekben látható. CRT3: független változóként a CHAID modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus és az altalaj és feltalaj megkülönböztetése kivételével - folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %), vízdoldhatóság-tartalmat (tömeg %) és pH_{H2O}-t.

A regressziós fa becslési pontossága jobb, mint a CHAID módszeré (4.15. táblázat). A teszt adatbázison végzett becslési hibákat elemezve (4.16. táblázat) viszont megállapítható, hogy a CHAID módszerrel becslült víztartó képesség értékek megbízhatóbb becslést eredményeznek, mint a regressziós fák (CRT3).

4.15. táblázat. A döntési fákkal (CHAID2 és CRT3) kidolgozott pedotranszfer szabályok becslési pontossága (a becslési hibák számítása a becslő adatbázisra) különböző mátrixpotenciálokon.

Becslő módszer	Becsült tulajdonság	Becslő adatbázis		Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintaszám
		Tanuló adatok	Kereszt-validált adatok		
		RMSE (tf%)	RMSE ^a (tf%)		
CRT3 (folytonos tulajdonságok, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1}$ kPa	4,347	5,888	0,803**	179
	θ_{-33} kPa	3,861	5,777	0,910**	179
	θ_{-1500} kPa	4,330	5,710	0,836**	179
	$\theta_{-150000}$ kPa	1,364	1,780	0,839**	179
	DV számított ^b	4,457	-	0,589**	179
CHAID2 (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1}$ kPa	5,228	6,002	0,698**	179
	θ_{-33} kPa	5,081	6,339	0,838**	179
	θ_{-1500} kPa	4,789	5,284	0,795**	179
	$\theta_{-150000}$ kPa	1,606	1,835	0,768**	179
	DV számított ^b	4,918	-	0,396**	179

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

^aA tízszer kereszt-validált validáló adatbázisrészek átlagos négyzetes hibáinak gyöke.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becslült víztartó képességekből számolva

4.16. táblázat. A döntési fákkal (CHAID2 és CRT3) kidolgozott pedotranszfer szabályok becslési megbízhatósága (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra) különböző mátrixpotenciálokon.

Becslő módszer	Becsült tulajdonság	Teszt adatbázis			Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintaszám
		ME (tf%)	RMSE (tf%)	RME (%)		
CRT3 (folytonos tulajdonságok, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	2,647	7,683	4,00	0,223	29
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	2,414	8,541	3,95	0,485**	29
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	1,949	5,342	3,55	0,709**	29
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,205	1,641	-12,48	0,726**	29
	DV számított ^b	0,465	6,641	-3,59	0,310	29
CHAID2 (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	1,183	5,160	1,38	0,620**	29
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	1,118	7,162	0,25	0,580**	29
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	1,730	4,773	5,77	0,776**	29
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	-0,426	1,447	-31,93	0,812**	29
	DV számított ^b	-0,612	4,967	-14,57	0,204	29

*A korreláció 0,05 szinten szignifikáns.

** A korreláció 0,01 szinten szignifikáns.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becslés víztartó képességeiből számolva.

Többszörös lineáris regresszió illesztése szerves anyagot nem tartalmazó szikes mintákra

A pedotranszfer függvények kidolgozásánál vizsgáltuk, hogy hogyan változik a becslés, ha a humusztartalom nem szerepel a becslésben beviteli paraméterként. Szikes talajokon a térfogattömeg víztartó képesség becslésben betöltött szerepét a fentiekben vizsgáltuk, ezért itt ezt nem elemeztük.

A becslés során az agyagtartalom minden víztartó képesség érték becslésénél szignifikáns független változó (4.17. táblázat). A mechanikai összetételen túl -0,1 kPa-on a pH, -33 kPa-on a kalcium-karbonát és a sótartalom, -1500 és -150000 kPa-on pedig a kalcium-karbonát tartalom szükséges még a víztartó képesség becsléséhez.

4.17. táblázat. Folytonos pedotranszfer függvények különböző mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékek becsléséhez folytonos talajtulajdonságok alapján (LR1)

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 45,421 + 0,006 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} - 0,100 \cdot \text{pH}^2$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 35,890 - 0,214 \cdot \text{homok} - 0,002 \cdot \text{CaCO}_3^2 + 0,002 \cdot \text{agyag}^2 + 4,807 \cdot \text{só}$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = -10,016 + 0,455 \cdot \text{agyag} + 0,195 \cdot \text{por} - 0,002 \cdot \text{CaCO}_3^2 + 2,619 \cdot \ln(\text{homok})$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = -3,222 + 0,003 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} - 0,050 \cdot \text{CaCO}_3 + 1,066 \cdot \ln(\text{homok}) + 0,001 \cdot \text{agyag}^2$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %), pH_{H2O} és vízzoldhatóság-tartalom (tömeg %).

A szerves anyag tartalom csak a telített víztartalom (-0,1 kPa) becslése esetén volt szignifikáns független változó a pedotranszfer függvények kidolgozásakor (4.17. és 4.18. táblázatok). A többi szívóerőn nem volt hatása a becslésre a humusztartalomnak. A 4.19. és 4.20. táblázatok tartalmazzák a kidolgozott regressziós egyenletek statisztikai mutatóit. A módosított R² értékek arra utalnak, hogy az adatok teljes varianciájának leírásához még más talajtulajdonságokra is szükség lenne, látható, hogy a -0,1 kPa-hoz tartozó víztartó képesség esetén már a humusztartalom bevonásával 66%-kal javul az R².

4.18. táblázat. Folytonos pedotranszfer függvények különböző mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékek becsléséhez folytonos talajtulajdonságok alapján, beleértve a szervesanyagot is (LR1)

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 39,163 + 0,005 \cdot \text{agyag-por} + 2,528 \cdot \ln(\text{humusz})$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %), pH_{H2O}, vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %) és szerves anyag tartalom (tömeg %).

4.19. táblázat. A többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becslő modellek (LR1 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{2,168} = 57,726 p < 0,0005		0,400
Víztartó képesség -33 kPa-on	F _{4,166} = 77,395 p < 0,0005		0,643
Víztartó képesség -1500 kPa-on	F _{4,166} = 65,260 p < 0,0005		0,602
Víztartó képesség -150000 kPa-on	F _{4,166} = 62,463 p < 0,0005		0,591

4.20. táblázat. A térfogattömeget is figyelembe vevő többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becslő modellek (LR2 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{2,168} = 71,098 p < 0,0005		0,664
Víztartó képesség -33 kPa-on†	-	-	-
Víztartó képesség -1500 kPa-on†	-	-	-
Víztartó képesség -150000 kPa-on†	-	-	-

†A szerves anyag tartalom nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

4.21. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési pontossága (a becslési hibák számítása a becslő adatbázisra) a különböző mátrixpotenciálokon.

Becslő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési pontosságot jellemző statisztikai hibák	Becslési pontosság				Mintaszám
			θ _{-0,1 kPa}	θ _{-33 kPa}	θ _{-1500 kPa}	θ _{-150000 kPa}	
LR1	folytonosak	ME (tf%)	0,058	0,000	0,048	-0,013	179§
		RME (%)	-1,49	-3,39	-13,35	-27,95	
		RMSE (tf%)	5,602	5,258	4,762	1,546	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,641**	0,807**	0,798**	0,787**	
LR2	folytonosak és szerves anyag	ME (tf%)	0,180	†	†	†	179
		RME (%)	-1,05	†	†	†	
		RMSE (tf%)	5,383	†	†	†	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,677**	†	†	†	

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) pH_{H2O} és vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %) valamint szerves anyag tartalom (tömeg %) az LR2 modell esetén.

†A szerves anyag tartalom nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

§Azon PTF-ek esetén, ahol a sótartalom is szignifikáns független változó, 171 minta alapján dolgoztuk ki a becslő módszert (LR1 θ_{-33kPa}), mert a többi mintára nem áll rendelkezésre mért vízdoldhatóság-tartalom érték.

A becslő módszer pontossága és megbízhatósága hasonló (4.21. és 4.22. táblázat), egyedül a -33 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becslése esetén magasabb az RMSE érték és alacsonyabb a Pearson-féle korreláció, tehát a validálás során pontatlanabb a módszer. Az átlagos relatív hiba (RME) a mátrixpotenciál érték növekedésével nő.

4.22. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési megbízhatósága a különböző mátrixpotenciálokon (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra).

Becslő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési hatékonyságot jellemző statisztikai hibák	$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	Mintaszám
LR1	folytonosak	ME (tf%)	2,380	1,948	2,048	-0,611	29 ^s
		RME (%)	3,90	2,96	6,55	-35,69	
		RMSE (tf%)	5,632	6,631	4,926	1,513	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,604**	0,613**	0,770**	0,821**	
LR2	folytonosak és szerves anyag tartalom	ME (tf%)	2,645	†	†	†	29
		RME (%)	4,55	†	†	†	
		RMSE (tf%)	5,545	†	†	†	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,650**	†	†	†	

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) pH_{H2O} és vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %) valamint szerves anyag tartalom (tömeg %) az LR2 modell esetén.

†A szerves anyag tartalom nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

§Azon PTF-ek esetén, ahol a sótartalom is szignifikáns független változó, 24 mintán ellenőriztük a becslés megbízhatóságát (LR1 $\theta_{-33 \text{ kPa}}$), mert a többi mintára nem áll rendelkezésre mért vízdoldhatóság-tartalom érték.

A módszerek összehasonlítása

A regressziós (CRT3) és a CHAID típusú (CHAID2) fák, valamint a szerves anyagot input paraméterként nem tartalmazó lineáris regresszió (LR1) megbízhatóságát összehasonlítottam a minták négyzetes eltérése alapján. A -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslés esetén a kereszt-validálás hibaértékei alapján a regressziós fa (CRT3) tűnik stabilabb módszernek (4.15. táblázat), mégis a CHAID típusú fával és a lineáris regresszióval becsült víztartó képesség értékek szignifikánsan megbízhatóbbak (4.16. táblázat). A többi mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom esetén nincs szignifikáns különbség a módszerek között. Ezen talajok esetén tehát a kategóriák alapján becslő CHAID módszer becslési megbízhatósága hasonló a lineáris regresszióéhoz.

4.3.1.2. A szikes talajok víztartó képességében szerepet kapó tényezők értékelése

A **homoktartalom** hatása kivétel nélkül, minden körülmény között negatív, az **agyagtartalomé** pedig pozitív, ami a szakirodalmi adatokkal megegyező eredmény. A **portartalom** hatása az agyag és homoktartalom arányától függ.

-33 és -1500 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség becsléséhez, a magas homoktartalmú minták esetén, csak a mechanikai összetétel a meghatározó a víztartó képesség szempontjából (példák: 12. melléklet: 2-es csomóponttól lefelé, 13. melléklet: 1., 4., 9., 10. csomópont).

Szerves anyag hatása minden mátrixpotenciálon a többi talajtulajdonságtól függetlenül mindig pozitív, tehát a növekedésével nő a víztartó képesség. A szerves anyag közvetve és közvetlenül is befolyásolja a talajok víztartó képességét. Közvetve a talaj szerkezetének kialakításával, ami a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom becslésénél tapasztalható (11. melléklet: az adatbázis két felé osztása a szerves anyag tartalom alapján történik). Közvetlenül pedig a szerves kolloidok vízfelvételével (Rajkai, 1988), melyek többszörösen meghaladják az agyagásványok víztartó képességét (Stefanovits et al., 1999), ezért fontos a -1500000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom becsléséhez (14. melléklet: 3. és 4. csomópont). Azonban nem minden esetben veszi figyelembe a becslő modell a víztartó képesség számításához, mert bizonyos esetekben a mechanikai összetétel a meghatározó és a szerves anyag hatása felett dominál, főleg, ha a vizsgált talajok szervesanyag-tartalma alacsony (3.5. táblázat: a szikes talajcsoport átlagos szervesanyag-tartalma 1,56%), ahogy ezt Rawls és munkatársai (2003) is megemlíti. A szerves anyag tartalmat a víztartó képesség becsléséhez, Rawls és munkatársai (1982, 1983, 2003), Rajkai (1988) és Wösten és munkatársai (1999) is fontosnak találták.

A magasabb **kalcium-karbonát tartalom** alacsonyabb víztartó képességet eredményez. Általában 10-33 % kalcium karbonát tartalom felett csökken a talajok víztartó képessége. Ilyen magas értékek esetén a kalcium-karbonát hidrofób tulajdonságai kerülnek előtérbe. A nagyon magas értékek (>33,5%) esetleg mészgöbcecsek előfordulására is utalhatnak. Rajkai (1988) és Khodaverdiloo és Homae (2004) is fontosnak találta a kalcium-karbonát tartalmat a talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak becsléséhez. Rajkai (1988) szikes talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslésénél találta szignifikáns független változónak. Az ő munkája is a víztartó képesség (-150000 kPa-on) és a kalcium-karbonát tartalom közötti negatív korrelációt bizonyítja. Khodaverdiloo és Homae (2004) sok kalcium-karbonátot tartalmazó talajok vízgazdálkodási tulajdonságait becsülték. Vizsgálataik bizonyították, hogy a víztartó képesség görbét leíró van Genuchten függvény telített nedvességtartalmának és α paraméterének becslését javítja, ha a talajok kalcium-karbonát tartalmát is figyelembe veszik az egyéb talajtulajdonságok mellett.

Kis szerves anyag tartalmú, valamint agyag és nehéz agyag fizikai féleségű minták esetén, a minták **vízoldható-só-tartalmának** is van hatása a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességre. Növekedésével csökken a víztartó képesség (11. és 16. melléklet: 7. és 8. csomópont: 0,14% felett; 21. melléklet: 9. és 10. csomópont: 0,25% felett). Ez a tömött, kedvezőtlen szerkezet és a peptizáció következménye lehet, amik nagymértékben csökkentik, leszűkítik a makropórusok mennyiségét (azon pórusok mennyiségét, amik elsősorban határozzák meg a talaj víztartó képességét -0,1 kPa mátrixpotenciálon). A talajok sótartalmát Rajkai (1988) is fontosnak találta, de az általa vizsgált minták esetén a -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom becsléséhez.

-0,1 és -33 kPa mátrixpotenciálon a **pH** növekedése negatívan hat a víztartó képességre (11. melléklet: 13. és 14. csomópont: 9,28 felett; 17. melléklet: 7. és 8. csomópont: 7,95 felett; 21. melléklet: 17. és 18. csomópont: 9 felett (6-os kódnál magasabb)). Ebben az esetben a magasabb pH a kedvezőtlenebb oszlopos szerkezetre utalhat. Az oszlopos tömődött szerkezet kisebb méretű és kevesebb kapilláris pórusokat tartalmaz, ezek mennyisége nagyban meghatározza a talajok víztartó képességét az említett mátrixpotenciálokon. -150000 kPa-on viszont 31,7-37,7% agyagtartalom és 21,5%-nál kisebb kalcium-karbonát tartalom esetén a 8,9-nél magasabb pH nagyobb víztartó képességet eredményez (14. melléklet: 19. és 20. csomópont). Itt talán a pH növekedése a növekedő Na-telítettségére utalhat, ezen talajtulajdonságok közötti közel lineáris összefüggést Stefanovits et al. (1999, 115 és 116. oldalon) is leírja. A kicserélhető Na tartalom növekedésével pedig nő a talajok vízfelvevő képessége. Hodnett és Tomasella (2002) szintén fontosnak találta a pH-t a talaj vízgazdálkodási tulajdonságok becsléséhez. Trópusi és mérsékeltövi talajok víztartó képességét leíró van Genuchten függvény paramétereit becsülték. Úgy gondolták, hogy a mállás indikátora a pH, mely így közvetve a talaj szerkezetéről, valamint agyagásvány összetételéről nyújt információt.

Az **altípus** hatása a víztartó képességre nagyon összetett. Magában foglal kémiai, fizikai, vízgazdálkodási és biológiai tulajdonságokat egyaránt. Az altípus víztartó képesség becslésében betöltött szerepének értelmezése, magyarázata további vizsgálatokat igényelne, melyre ebben a dolgozatban nincs lehetőségem. Az értelmezést az is megnehezíti, hogy a szikes talajok vizsgálatánál a C-szinteket is figyelembe vettem, amire már az altípus nyújtotta összetett információk nem minden szempontból érvényesek. Ezen okból is döntöttem úgy, hogy a többi alcsoportnál a fa módszer esetén kiveszem a vizsgálatból a C-szinteket és megkülönböztetem a feltalajt és az altalajt.

A regresszióval kidolgozott becslések eredményei jól mutatják, hogy a **térfogattömeg** ismeretével a -0,1 és -33 kPa-hoz tartozó víztartó képesség becslése nagymértékben javul (4.10. és 4.11. táblázat). A -1500 és -150000 kPa-hoz tartozó víztartó képesség értékek térfogattömeg nélkül hasonló megbízhatósággal becsülhetők, mint a térfogattömeg ismeretében.

4.3.2. Barna edőtalajok

4.3.2.1. Becslés klasszifikációs fákkal

A víztartó képesség becslésére kidolgozott klasszifikációs fák (CRT, CHAID és CRT_kat) összefoglaló jellemzőit a 4.23. táblázat tartalmazza, melyet az alábbiakban a CRT_kat módszer kivételével részletesebben is kifejtünk (magyarázatot lásd a 4.2.4. fejezetben).

4.23. táblázat. A klasszifikációs fával kidolgozott becslő módszerek (pedotranszfer szabályok) áttekintő táblázata.

Becslés típusa	Becsült víztartó képesség	A becsléshez figyelembe vett input paraméterek	Elkülönített csoportok száma
CRT3	$\theta_{-0,1}$ kPa	pH, homok, kalcium-karbonát, altípus	7
	θ_{-33} kPa	homok, altípus, por	9
	θ_{-1500} kPa	homok, agyag, altípus, kalcium-karbonát, pH, humusz, por	19
	$\theta_{-150000}$ kPa	agyag, homok, altípus, por, humusz	15
CHAID2	$\theta_{-0,1}$ kPa	kalcium-karbonát, pH, fizikai féleség kód	6
	θ_{-33} kPa	fizikai féleség, altípus kód	10
	θ_{-1500} kPa	fizikai féleség, humusz, pH kód	8
	$\theta_{-150000}$ kPa	fizikai féleség, altípus, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	10
CRT_kat	$\theta_{-0,1}$ kPa	pH, kalcium-karbonát, altípus kód	5
	θ_{-33} kPa	fizikai féleség, altípus, kalcium-karbonát kód	10
	θ_{-1500} kPa	fizikai féleség, altípus, humusz kód	11
	$\theta_{-150000}$ kPa	fizikai féleség, altípus, kód	11

CHAID2, CRT_kat: független változói kategória típusúak, melyek a térképi kódoknak felelnek meg, valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése. A talajtérképi kódok jelentése talajtulajdonságokként az 1-3. és 6. mellékletekben látható. CRT3: független változóként a CHAID modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus és az altalaj és feltalaj megkülönböztetése kivételével - folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) tartalmat és $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ -t.

CRT3: folytonos értékek, altípus valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése alapján

-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A pH az első talajtulajdonság ami alapján két csoportba osztja az adatbázist a regressziós fa (51. melléklet). A 7,22-nél kisebb vagy egyenlő pH értékű talajokat a homoktartalmuk alapján csoportosítja tovább. A 7,22-nél nagyobb pH-jú talajokat pedig a kalcium-karbonát tartalmuk és az altípusuk alapján különíti el.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Első lépésben a talajok homoktartalma alapján kerülnek szétválasztásra a minták (52. melléklet). A kisebb és nagyobb homoktartalmú mintákat is a homoktartalom és az altípus alapján csoportosítja tovább a módszer, csak a nagyobb homoktartalmúak (>45,85%) esetén a portartalmat is figyelembe veszi az elkülönítésnél.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A regressziós fa ezen a mátrixpotenciál értéken is a minták homoktartalma alapján különíti el a mintákat az első lépésben (53. melléklet). Az 55,02%-nál kisebb vagy egyenlő homoktartalmú talajokat további nyolc szinten választja ketté a módszer, amihez az agyagtartalmat, homoktartalmat, altípust, kalcium-karbonát tartalmat, pH-t és humusztartalmat veszi figyelembe. Az 55,02%-nál nagyobb homoktartalmú minták az agyag és kalcium-karbonát tartalmuk, valamint altípusuk alapján kerülnek szétválasztásra.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Az első lépésben az agyagtartalom alapján osztja két csoportra az adatokat a fa módszer (54. melléklet). A 27,87%-nál kisebb vagy egyenlő agyagtartalmú talaj csoportosítását a homok, agyag, portartalmuk, altípusuk és humusz tartalmuk alapján végzi. A 27,87%-nál nagyobb agyagtartalmúakat az altípus, agyag, homok és humusztartalom figyelembe vételével válogatja szét.

CHAID2: kategóriák, altípus valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése alapján*-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom*

A minták először a kalcium-karbonát tartalom kategória alapján kerülnek felosztásra: három csoportba (55. melléklet). A kalcium-karbonátot nem tartalmazó minták kerülnek az első csoportba, ezeket a mintákat a pH értékük alapján csoportosítja a módszer. A 0,1-10,0% kalcium-karbonátot tartalmazó mintákat a fizikai féleség alapján osztja három csoportra a fa. 10,0%-nál nagyobb kalcium-karbonát tartalmú talajok nem kerülnek további felosztásra.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A mintákat első szinten a fizikai féleség alapján, második szinten az altípus alapján különíti el a módszer (56. melléklet). Ez alól az agyagos vályognál finomabb fizikai féleségű talajok (5. csoport) a kivételek, mert azok nem kerülnek további felosztásra. A durva homok és homok talajok alkotják az első csoportot, a homokos vályogok a második, a vályogok a harmadik, az agyagos vályogok a negyedik csoportot.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A -33 kPa mátrixpotenciál értékhez tartozó nedvességtartalomhoz hasonlóan itt is a fizikai féleség alapján ugyanazon öt csoportra különíti el a fa a talajokat (57. melléklet). Ezen a mátrixpotenciálon viszont csak az első és harmadik csoportot osztja tovább. A durva homok és homok fizikai féleségű talajokat a humusztartalmuk alapján, a vályog talajokat a pH értékük alapján.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Ezen a mátrixpotenciálon is a -33 és -1500 kPa-hoz hasonlóan a fizikai féleséget figyelembe véve ugyanazon öt csoportot különíti el a fa első lépésben (58. melléklet). Ezek közül a homokos vályogokat és az agyagos vályognál finomabb fizikai féleségű talajokat nem csoportosítja tovább. A másik három csoportot az altípus alapján osztja tovább, a vályog talajoknál ezen felül még a feltalajt és altalajt is figyelembe veszi.

A módszerek becslési pontosságát és megbízhatóságát jellemző statisztikai mutatók a 4.30. és 4.31. táblázatokban látható. Az eredmények értékelését a 4.3.2.3. fejezetben mutatom be.

4.3.2.2. Pedotranszfer függvények többszörös lineáris regresszióval

PTF az A, B és C szintek alapján

A 4.24. és 4.25. táblázatban látható a különböző mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékek becslésére kidolgozott regressziós egyenletek. A regressziós becslés során az agyag és homoktartalom mind a négy vizsgált mátrixpotenciál értéken fontos a víztartó képesség becsléséhez. A humusztartalom ismerete a -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség becsléséhez szükséges. A kalcium-karbonát tartalmat a módszer a -0,1 és -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom becsléséhez veszi figyelembe. A portartalom és a pH a -0,1, -33 és -150000 kPa mátrixpotenciálokban tartalmazza a becslésben a lineáris regresszió.

4.24. táblázat. Folytonos pedotranszfer függvények a -0,1, -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékek becsléséhez azon talajtulajdonságok alapján, amik hasonlóak a részletes talajtérképeken található talajtulajdonságokhoz, de azokat folytonos értékekkel jellemzik (LR1).

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 83,886 + 0,061 \cdot \text{CaCO}_3 - 0,004 \cdot \text{homok}^2 + 3,178 \cdot \ln(\text{homok}) + 0,067 \cdot \text{pH}^2 - 0,008 \cdot \text{agyag} \cdot \text{homok} - 10,344 \cdot \ln(\text{por}) - 33,152 \cdot \text{por}^{-1} - 0,003 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por}$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 37,395 + 0,001 \cdot \text{homok}^2 + 0,001 \cdot \text{agyag}^2 - 0,074 \cdot \text{pH}^2 + 0,052 \cdot \text{CaCO}_3 - 19,639 \cdot \text{por}^{-1} - 0,005 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} + 3,821 \cdot \ln(\text{agyag}) - 0,339 \cdot \text{homok}$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 10,467 + 0,371 \cdot \text{agyag} - 0,001 \cdot \text{homok}^2 + 0,856 \cdot \text{humusz} - 1,206 \cdot \ln(\text{agyag})$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 6,352 + 0,077 \cdot \text{humusz}^2 - 8,120 \cdot \text{pH}^{-1} - 3,351 \cdot \text{por}^{-1} + 0,216 \cdot \text{agyag} - 2,804 \cdot \ln(\text{agyag}) - 3,499 \cdot \text{agyag}^{-1} + 0,001 \cdot \text{agyag} \cdot \text{homok}$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

Az 4.25. táblázat tartalmazza azon regressziós egyenleteket (LR2), amik a talaj térfogattömegét is figyelembe veszik a becslés során. Az LR2 becselő függvények a -33 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becsléséhez nem tartalmazzák a térfogattömeget, ebben az esetben ugyanazt a PTF-et kaptuk, mint az LR1 függvények esetén (4.24. táblázat).

A 4.26. és 4.27. táblázatban láthatók a kidolgozott regressziós egyenletek főbb statisztikai mutatói. A módosított R² érték a térfogattömeg bevonásával csak a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslésénél növekszik nagy mértékben (230 %-kal), becslésben betöltött szerepe a többi vizsgált mátrixpotenciálon nem jelentős.

4.25. táblázat. A térfogattömeget is figyelembe vevő folytonos pedotranszfer függvények (LR2). A -33 kPa-hoz tartozó víztartó képesség becsléséhez a vizsgált minták esetén nem volt szignifikáns változó a térfogattömeg, ezért arra ennél a módszernél ugyanazt a becslő egyenletet kaptuk, mint az LR1 függvények esetén.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 63,526 - 10,247 \cdot \text{térfogattömeg}^2 - 0,001 \cdot \text{homok}^2 - 0,642 \cdot \ln(\text{humusz}) + 1,164 \cdot \ln(\text{homok}) + 0,032 \cdot \text{pH}^2$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 26,372 + 0,388 \cdot \text{agyag} - 0,002 \cdot \text{homok}^2 - 13,358 \cdot \text{térfogattömeg}^{-1} + 0,892 \cdot \text{humusz} - 1,522 \cdot \ln(\text{agyag}) - 0,003 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} - 0,002 \cdot \text{por} \cdot \text{homok}$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 6,212 + 0,080 \cdot \text{humusz}^2 - 8,648 \cdot \text{pH}^{-1} - 3,427 \cdot \text{por}^{-1} + 0,123 \cdot \text{térfogattömeg}^2 - 3,547 \cdot \text{agyag}^{-1} + 0,217 \cdot \text{agyag} - 2,832 \cdot \ln(\text{agyag}) + 0,001 \cdot \text{agyag} \cdot \text{homok}$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), térfogattömeg (g cm⁻³) szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %), pH_{H2O} és térfogattömeg.

Az 4.24. és 4.25. táblázatokból látható, hogy a térfogattömeg szignifikáns független változó a víztartó képesség becslő modellekben -0,1, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokra, de a becslési pontosságot (4.28. táblázat) és megbízhatóságot (4.29. táblázat) csak a -0,1 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom esetén növeli szignifikánsan. -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciál értékeken a térfogattömeg ismerete nélkül hasonló pontossággal és megbízhatósággal becsülhető a víztartó képesség, mint a térfogattömeget figyelembe véve.

4.26. táblázat. A többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becslő modellek (LR1 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{8,1105} = 34,250	p < 0,0005	0,193
Víztartó képesség -33 kPa-on	F _{8,1105} = 254,465	p < 0,0005	0,637
Víztartó képesség -1500 kPa-on	F _{4,1109} = 451,281	p < 0,0005	0,618
Víztartó képesség -150000 kPa-on	F _{9,1104} = 197,359	p < 0,0005	0,614

4.27. táblázat. A térfogattömeget is figyelembe vevő többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becslő modellek (LR2 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{5,1108} = 516,016	p < 0,0005	0,698
Víztartó képesség -33 kPa-on†	-	-	-
Víztartó képesség -1500 kPa-on	F _{7,1106} = 281,868	p < 0,0005	0,639
Víztartó képesség -150000 kPa-on	F _{10,1103} = 178,220	p < 0,0005	0,614

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanaz az egyenlet, mint az LR1 modell esetén.

4.28. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési pontossága (a becslési hibák számítása a becslő adatbázisra) a különböző mátrixpotenciálokon (-0,1, -33, -1500 and -150000 kPa).

Becslő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési pontosságot jellemző statisztikai hibák	$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	Mintasza
LR1	folytonosak	ME (tf%)	0,000	0,000	0,000	0,00	1114
		RME (%)	-1,12	-3,43	-9,73	-21,09	
		RMSE (tf%)	4,637	4,280	3,731	0,898	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,446**	0,800**	0,787**	0,785**	
LR2	folytonosak és térfogattömeg	ME (tf%)	0,000	†	0,000	0,000	1114
		RME (%)	-0,39	†	-8,81	-20,93	
		RMSE (tf%)	2,839	†	3,625	0,897	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,836**	†	0,801**	0,786**	

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ valamint térfogattömeg az LR2 modell esetén.

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

4.29. táblázat A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési megbízhatósága különböző mátrixpotenciálokon (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra).

Becslő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési hatékonyságot jellemző statisztikai hibák	$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	Mintasza
LR1	folytonosak	ME (tf%)	-0,968	-0,061	0,452	0,170	126
		RME (%)	-3,52	-2,59	-3,98	-21,99	
		RMSE (tf%)	5,207	4,594	4,005	1,141	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,336**	0,709**	0,748**	0,758**	
LR2	folytonosak és térfogattömeg	ME (tf%)	0,051	†	0,953	0,161	126
		RME (%)	-0,30	†	3,22	-22,35	
		RMSE (tf%)	2,606	†	3,938	1,131	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,878**	†	0,777**	0,762**	

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ valamint térfogattömeg az LR2 modell esetén.

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

Az A és B szintekre (763 db mintára) kidolgozott pedotranszfer függvények az 59. és 60. mellékletekben láthatók. A térfogattömeget input paraméterként nem tartalmazó PTF (LR1_AB) becslési pontosságát és megbízhatóságát a 4.30. és 4.31. táblázatok mutatják. A térfogattömeg nélküli (LR1_AB) egyenletet és a klasszifikációs fák (CRT3, CHAID2) eredményeinek összehasonlítása a 4.3.2.3. fejezetben szerepel. Csak az A és B szinteket figyelembe vevő PTF kidolgozását az indokolta, hogy a lineáris regresszióval és a klasszifikációs fákkal kidolgozott becslő módszerek összehasonlíthatóak legyenek. A csoportosítás nélkül kidolgozott folytonos pedotranszfer függvények eredményeivel mind a térfogattömeget tartalmazó, mind pedig a térfogattömeg nélküli becslő egyenletek becslési pontosságát és megbízhatóságát összevetettem (4.4.1. fejezet).

4.3.2.3. A módszerek összehasonlítása

Folytonos és kategória értékek

A folytonos értékeket alapján kidolgozott regressziós fa (CRT3) becslési pontossága -33, -1500 és 15000 kPa mátrixpotenciálon szignifikánsan jobb volt a kategóriák alapján becslő regressziós fánál (CRT_kat) (62-64. melléklet). A becslés megbízhatósága a -33 kPa mátrixpotenciál kivételével a folytonos értékek alapján jobb (4.31. táblázat), de a módszerek becslési hibájának négyzete nem különbözött egymástól szignifikánsan (66-70. melléklet).

Bár a minták négyzetes eltérését tekintve nincs szignifikáns különbség a módszerek megbízhatósága között, az eredmények arra utalnak, hogy a barna erdőtalajok esetén a folytonos talajtulajdonságok ismeretével pontosabban becsülhető a víztartó képesség, mint a térképi kategóriák alapján (4.30. táblázat).

Regressziós fa (CRT) és CHAID

A kategóriák és altípus alapján becslő CHAID és regressziós fák (CRT_kat) eredményei nem különböznek egymástól szignifikánsan sem a pontosságot, sem a megbízhatóságot tekintve (61-70. mellékletek). A -33, -1500 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom és a hasznosítható vízkészlet becslésénél a CRT_kat módszer valamivel pontosabb (4.30. táblázat). A megbízhatósága viszont a CHAID módszernek jobb a -1500, -15000 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom és hasznosítható vízkészlet becslésénél (4.31. táblázat).

A végső csoportok számát tekintve a fa mérete hasonló a két módszernél.

4.30. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott klasszifikációs fák (pedotranszfer szabályok) becslési pontossága különböző mátrixpotenciálokon (a becslési hibák számítása a becslő adatbázisra).

Becslő módszer	Becsült tulajdonság	Becslő adatbázis		Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintaszám
		Tanuló adatok	Kereszt-validált adatok		
		RMSE (tf%)	RMSE ^a (tf%)		
CRT3 (folytonos tulajdonságok, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,649	4,900	0,397**	763
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,996	4,304	0,788**	763
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,291	3,783	0,820**	763
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,756	0,867	0,810**	763
	DV számított ^b	4,486	-	0,455**	763
CHAID2 (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,737	4,838	0,354**	763
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,505	4,782	0,706**	763
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,022	4,122	0,714**	763
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,961	0,989	0,667**	763
	DV számított ^b	4,283	-	0,307**	763
CRT_kat (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,757	4,862	0,344**	763
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,493	4,754	0,708**	763
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,985	4,147	0,720**	763
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,964	0,991	0,664**	763
	DV számított ^b	4,456	-	0,321**	763
LR1_AB (folytonos tulajdonságok)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,685	-	0,380**	763
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,182	-	0,754**	763
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,621	-	0,776**	763
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,829	-	0,766**	763
	DV	4,382	-	0,355**	763
	DV számított ^b	4,446	-	0,318**	763

^aA tízszer kereszt-validált validáló adatbázisrészecskék átlagos négyzetes hibáinak gyöke, amit a CRT és CHAID módszerekre végeztem el.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becslő víztartó képességekből számolva

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Kategória típusú független változók: fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát és pH kód.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

Többszörös lineáris regresszió és regressziós fa módszer (CRT)

A folytonos értékek és altípus alapján kidolgozott regressziós fák (CRT3), valamint csak a folytonos értékek alapján kidolgozott lineáris regresszió (LR1_AB) becslési pontossága és megbízhatósága hasonló (nem különböznek szignifikánsan) (4.30. és 4.31. táblázat, 61-70. mellékletek). A pontosságot tekintve a regressziós fa mind a négy vizsgált mátrixpotenciál értéken jobb. A megbízhatóság szempontjából -0,1, -33 és -1500 kPa-on a lineáris regresszió a jobb, a -150000 kPa nedvességtartalom és a hasznosítható vízkészlet becslésénél pedig a regressziós fa. A regressziós fa jobb pontosságát a módszerbeli különbségen kívül a talaj altípusának figyelembe vétele is okozhatja, pontosabb magyarázat azonban csak a talaj altípusa nélküli regressziós fa kidolgozásával kapható (ugyanazon input paraméterek alapján kidolgozott regressziós fa és lineáris regresszió összehasonlítását a szikes talajoknál végeztem, lásd a 4.2.3.2. fejezetben).

4.31. táblázat A víztartó képesség becslésére kidolgozott klasszifikációs fák (pedotranszfer szabályok) becslési megbízhatósága különböző mátrixpotenciálokon (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra).

Becslő módszer	Becsült tulajdonság	Teszt adatbázis			Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintasza
		ME (tf%)	RMSE (tf%)	RME (%)		
CRT3 (folytonos tulajdonságok, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-1,622	5,100	-5,10	0,322**	81
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	-1,004	4,372	-8,29	0,814**	81
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	0,755	4,560	-4,62	0,663**	81
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	-0,030	0,815	-28,18	0,675**	81
	DV számított ^b	-1,760	4,597	-30,84	0,515**	81
CHAID2 (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-1,610	5,202	-5,13	0,250*	81
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	-0,891	5,171	-9,32	0,706**	81
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	0,310	4,515	-12,25	0,649**	81
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	-0,213	0,977	-41,77	0,535**	81
	DV számított ^b	-1,200	5,075	-29,70	0,191	81
CRT_kat (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-1,453	5,123	-4,97	0,282*	81
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	-1,542	5,165	-11,56	0,738**	81
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	0,209	4,484	-11,99	0,655**	81
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	-0,075	1,007	-34,605	0,477**	81
	DV számított ^b	-1,751	5,237	-34,626	0,185	81
LR1_AB (folytonos tulajdonságok)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-1,520	4,883	-4,82	0,407**	81
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	-0,661	4,121	-6,44	0,836**	81
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	0,763	4,185	-2,35	0,720**	81
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,383	0,910	-1,50	0,668**	81
	DV	-1,561	4,821	-31,07	0,394**	81
	DV számított ^b	-1,424	4,809	-30,56	0,383**	81

*A korreláció 0,05 szinten szignifikáns.

** A korreláció 0,01 szinten szignifikáns.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becslési víztartó képességekből számolva

Kategória típusú független változók: fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát tartalom és pH kód.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

4.3.2.4. A barna erdőtalajok víztartó képességében szerepet kapó tényezők értékelése

A barna erdőtalajok víztartó képességének klasszifikációs fákkal történő becslésénél a fizikai féleség mellett a talaj kalcium-karbonát tartalma is fontos. A **kalcium-karbonát** a legfontosabb talajtulajdonság a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség kategóriák alapján történő becsléséhez (55. melléklet). Ha folytonos értékek állnak rendelkezésre, akkor a **pH** a legfontosabb független változó a becslésben (51. melléklet). Minél több kalcium-karbonátot tartalmaz a talaj, annál több nedvességet tart vissza telített állapotban. Ezen a szívóerőn a kalcium-karbonát szerkezetjavító hatása érvényesül a becslésben, mert a kalcium ionok koaguláló és cementáló tulajdonságokkal rendelkeznek (Stefanovits et al., 1999). A jobb szerkezet és ezáltal a mészgöbcecsek jelenléte a makropórusok mennyiségét növeli. A pH esetén a 7,22-nál nagyobb értékek eredményeznek nagyobb víztartó képességet. Ebbe a csoportba 336 db talaj tartozik (51. melléklet: 1. csomópont), amiből 176-nak 6,8-nál is alacsonyabb a pH-ja, tehát a savanyú tartományba tartozik. A savanyú talajok szerkezetére pedig tömődött, kevés makropórust tartalmazó szerkezet a jellemző (Stefanovits et al., 1999), emiatt alacsonyabb a víztartó képességük -0,1 kPa mátrixpotenciálon.

A **pH** víztartó képességre gyakorolt hatása -1500 kPa változatosabb (57. melléklet: 8-10. csomópont), mint -0,1 kPa-on. Vályog fizikai féleségű talajok esetén a 6,8-nál kisebb vagy egyenlő pH értékű talajok víztartó képessége a legalacsonyabb, azonban a 6,8-nál nagyobb pH-jú talajokat még további két csoportra lehet osztani. A 6,81-7,2 pH-jú, tehát semleges talajok víztartó képessége a legjobb. A 7,2-nél nagyobb pH értékű talajok víztartó képessége ugyan magasabb, mint a savanyú talajoké, de a semleges talajokénál rosszabb. Ez egy olyan összefüggés típus, amit a lineáris regresszióval nem lehet vizsgálni.

A **kalcium-karbonát tartalom** víztartó képességre gyakorolt hatása attól is függ, hogy mely mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességet vizsgáljuk. A fent bemutatott hatása -0,1 kPa esetén áll fenn. -1500 kPa-on viszont bizonyos esetekben (19,12-55,02% közötti homoktartalom és 24,84-nél kisebb egyenlő agyagtartalom) nagymértékű növekedése (24,5% fölötti tartalom) negatívan hat a víztartó képességre (53. melléklet: 17. és 18. csomópont). Ebben az esetben a magas kalcium-karbonát tartalom, már mészkonkréciók előfordulására utalhat, ami csökkenti a víztartó képességet, mivel a vizet visszatartó kisméretű pórusok mennyisége lecsökken az egységnyi talajtérfogatban (Rajkai szóbeli közlés, 2011).

A többi szívéerőn a **fizikai féleség** a legfontosabb a becslésben. A klasszifikációs fák esetén is látható (56-58. melléklet), hogy minél finomabb a szemcseösszetétel, annál több vizet tart vissza a talaj, ahogyan az a szakirodalomból is ismert. Egy esetben volt kivétel, amikor a CHAID módszerrel történik a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom becslése. Ekkor a 0,1-10,0% kalcium-karbonát tartalmú mintáknál a vályog fizikai féleségű talajoknak magasabb a víztartó képessége, mint az annál finomabb fizikai féleségű talajoké. Ebben az esetben talán az agyagos vályognál finomabb fizikai féleségű szintek tömődöttebbek, kevesebb makropórust tartalmaznak, ennek következménye a kisebb víztartó képesség.

A -0,1 és -33 kPa mátrixpotenciálon a különböző szemcsefrakciók közül a **homoktartalom** a legmeghatározóbb (51. és 52. mellékletek), -1500 és -150000 kPa-on az **agyagtartalom** (53. és 54. mellékletek). A szakirodalom szerint -3 és -200 kPa mátrixpotenciál tartományban a finom homokfrakció (0,25-0,05 mm) a meghatározó, mert ebben a tartományban ürül le, az ezen szemcsefrakciók között kialakuló kapilláris-gravitációs pórusrendszer. A -200 kPa mátrixpotenciálnál kisebb tartományban a szorpciók erői hatása a döntő, tehát az agyagtartalom a meghatározó (Rajkai et al., 1981; Várallyay, 2002b).

A regressziós fa (ahol az altípus és a feltalaj és altalaj elkülönítésén kívül a többi talajtulajdonság folytonos) elemzésekor látható, hogy azon minták esetén, ahol a homok és/vagy az agyagtartalom dominál a portartalom felett (magas homok és alacsony agyagtartalmú minták, közepes homok és agyagtartalmúak, valamint a magas agyagtartalmúak), csak a mechanikai összetétel szükséges a víztartó képesség becsléséhez (52. melléklet: 13. és 14. csomópont; 53. melléklet: 4., 5., 10. csomópont; 54. melléklet: 6., 9. csomópont).

A **humusz tartalom** nem bizonyult szignifikáns becselő változónak -0,1 kPa-on, annak ellenére, hogy a talajszerkezet kialakulására hatással van. Ennek az lehet az oka, hogy az adatbázisunkban szereplő BET-ok átlagos humusztartalma 0,81% (3.7. táblázat), tehát a humusztartalomban nincs nagy eltérés a minták között. Alacsony humusztartalom esetén, pedig a különböző szerves anyag tartalomból eredő szerkezetbeli különbségek nem

jelentősek. Ráadásul a barna erdő talajoknál a víztartó képesség szempontjából a savanyúság, illetve a kalcium-karbonát tartalom meghatározóbb a szerkezet kialakulását tekintve, hiszen savanyú közegben és kalcium ionok jelenléte nélkül a szerves anyag nem tudja cementálni az ásványi részecskéket (Stefanovits et al., 1999). -1500 és -150000 kPa-on viszont már nagyobb a jelentősége a becslésben, ami a szerves kolloidok vízmegkötő képességével magyarázható (53. és 54. mellékletek) Egy esetben nehezen értelmezhető, hogy kis mértékű szerves anyag növekedésének hatására (>0,6%) mi az oka a víztartó képesség csökkenésének (53. melléklet: 25. és 26. csomópont). Talán egy olyan egyéb talajtulajdonság okozhatja a víztartó képesség csökkenését, ami nem szerepel a vizsgált független változók között, de negatívan korrelál a szerves anyag tartalommal és a víztartó képességre gyakorolt negatív hatása dominál a szerves anyag pozitív hatása felett.

4.3.3. Csernozjomok

A nem szikes csernozjom talajokra kidolgozott regressziós és CHAID típusú döntési fák legfontosabb jellemzői a 4.32. táblázatban láthatók. A kidolgozott modelleket a CRT_kat módszer kivételével (magyarázatot lásd a 4.2.4. fejezetben) a következőkben részletezem.

4.32. táblázat. A klasszifikációs fával kidolgozott becslő módszerek (pedotranszfer szabályok) áttekintő táblázata.

Becslés típusa	Becsült víztartó képesség	A becsléshez figyelembe vett input paraméterek	Elkülönített csoportok száma
CRT3	$\theta_{-0,1}$ kPa	homok, kalcium-karbonát, altípus	6
	θ_{-33} kPa	homok, agyag, humusz	10
	θ_{-1500} kPa	agyag, homok, humusz, altípus	10
	$\theta_{-150000}$ kPa	agyag, humusz, altípus, kalcium-karbonát, homok, por	23
CHAID2	$\theta_{-0,1}$ kPa	fizikai féleség, kalcium-karbonát, humusz, altípus kód	10
	θ_{-33} kPa	fizikai féleség, humusz, altípus, kalcium-karbonát kód	9
	θ_{-1500} kPa	fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát, feltalaj és altalaj megkülönböztetése, altípus kód	15
	$\theta_{-150000}$ kPa	fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát, pH, altípus kód	22
CRT_kat	$\theta_{-0,1}$ kPa	fizikai féleség, kalcium-karbonát, feltalaj és altalaj megkülönböztetése, pH, altípus, humusz kód	14
	θ_{-33} kPa	fizikai féleség, altípus, humusz, kalcium-karbonát kód, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	11
	θ_{-1500} kPa	fizikai féleség, kalcium-karbonát, humusz, altípus kód, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	27
	$\theta_{-150000}$ kPa	fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát, altípus, pH kód, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	53

CHAID2, CRT_kat: független változói kategória típusúak, melyek a térképi kódoknak felelnek meg, valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése. A talajtérképi kódok jelentése talajtulajdonságokként az 1-3. és 7. mellékletekben látható. CRT3: független változóként a CHAID modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus és az altalaj és feltalaj megkülönböztetése kivételével – folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) tartalmat és pH_{H_2O} -t.

4.3.3.1. Becslés klasszifikációs fákkal

CRT3: folytonos értékek, altípus valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése alapján

-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Első szinten a homoktartalom alapján különbözteti meg a talajokat a módszer (71. melléklet). A 35,88%-nál kisebb vagy egyenlő homoktartalmú mintákat a kalcium-karbonát tartalmuk, altípusuk és homoktartalmuk alapján különíti el további csoportokra. A 35,88%-nál nagyobb homoktartalmúakat a homoktartalom alapján osztja további két csoportra.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Első szinten ezen a mátrixpotenciálon is a homoktartalom alapján osztja két csoportba az adatokat (72. melléklet) a regressziós fa. A 42,76%-nál kisebb vagy egyenlő homoktartalmú

mintákat az agyag, homok és humusztartalmuk alapján különíti el. A nagyobb homoktartalmúakat (>42,76%), pedig ismét csak a homoktartalom alapján válogatja ketté.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Az adatokat először az agyagtartalom alapján választja szét (73. melléklet). A 29,05%-nál kisebb vagy egyenlő agyagtartalmú talajokat a homok, humusz, agyagtartalmuk és altípusuk alapján csoportosítja. A 29,02%-nál nagyobb agyagtartalmúakat az agyag és a humusztartalmuk alapján különíti el.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Először az agyagtartalom szerint osztja két csoportra a mintákat a regressziós fa (74. melléklet). A 28,46%-nál kisebb vagy egyenlő agyagtartalmú talajoknál a humusz, agyag, kalcium-karbonát tartalmat, altípust, homok és portartalmat veszi figyelembe a csoportosításnál. A 28,46%-nál nagyobb agyagtartalmúaknál, pedig az agyagtartalom, altípus és kalcium-karbonát tartalom alapján válogatja szét az adatokat.

CHAID2: kategóriák, altípus valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése alapján

-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A vizsgált talajokat a fizikai féleség alapján osztja öt nagy csoportra a módszer (75. melléklet). Az első csoportot a durva homok, homok fizikai féleségű minták alkotják, a másodikat a homokos vályogok, a harmadikat a vályogok, a negyediket az agyagos vályogok, az ötödiket az agyagos vályognál finomabb fizikai féleségű talajok. Az első és ötödik csoportot nem osztja tovább. A homokos vályogokat a kalcium-karbonát kategóriák szerint válogatja szét, a vályogokat a humusztartalom kategóriák és az altípus alapján, az agyagos vályogokat szintén a kalcium-karbonát kategóriák alapján.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Ezen a mátrixpotenciálon is az első lépésben ugyanarra az öt csoportra osztja fel a talajokat a módszer, mint az előző mátrixpotenciálon (76. melléklet). Itt azonban a homokos vályogokat a humusztartalom kategóriák alapján választja szét, a vályogokat az altípus és a kalcium-karbonát tartalom kategóriák szerint, az agyagos vályogokat pedig a humusztartalom kategóriák szerint.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Itt az első szinten a fizikai féleség alapján már 6 csoportra osztja szét a talajokat a módszer (77. melléklet). A durva homok és homok fizikai féleségű minták külön csoportba kerülnek, de egyik sem kerül további felosztásra. A homokos vályogok – ahogy -33 kPa-on is – a humusztartalom kategóriák alapján különülnek el. A vályog talajoknál a humusztartalom kategóriák mellett a feltalaj és altalaj megkülönböztetését is figyelembe veszi a módszer a további csoportképzés során. Az agyagos vályog talajok további felosztásához is fontos a humusztartalom, és amellet még az altípus. Az agyagos vályognál finomabb fizikai féleségű talajokat a kalcium-karbonát tartalom kategóriák és az altípus alapján különíti el.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Ezen a mátrixpotenciálon a fizikai féleség alapján újra öt csoportra osztja az adatokat a módszer (78. melléklet). A durva homok és homok talajokat a humusztartalom kategóriák és a pH alapján csoportosítja, a homokos vályogokat a humusztartalom kategóriák, a

vályogokat a kalcium-karbonát tartalom kategóriák és a pH, az agyagos vályog talajokat a kalcium-karbonát és az altípus, az agyagos vályognál finomabb fizikai féleségű talajokat szintén a kalcium-karbonát tartalom kategóriák és az altípus alapján.

A módszerek becslési pontosságát és megbízhatóságát jellemző statisztikai mutatók a 4.39. és 4.40. táblázatokban látható. Az eredmények értékelését a 4.3.3.3. fejezetben mutatom be.

4.3.3.2. Pedotranszfer függvények többszörös lineáris regresszióval

PTF az A, B és C szintek alapján

A 4.33. táblázatban láthatók a kidolgozott pedotranszfer függvények. Az agyag és homoktartalom mind a négy mátrixpotenciál értéken szükséges a víztartó képesség becsléséhez. A humusztartalom ismerete a -33 és -1500 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becsléséhez fontos. A kalcium-karbonát tartalom a -0,1, -1500 és -150000 kPa-on szerepel a lineáris regressziós becslésben. A pH a -0,1, és -150000 kPa-hoz tartozó víztartó képességet leíró függvényekben szerepel.

4.33. táblázat. Folytonos pedotranszfer függvények a -0,1, -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékek becsléséhez azon talajtulajdonságok alapján, amik hasonlóak a részletes talajtérképeken található talajtulajdonságokhoz, de azokat folytonos értékekkel jellemzik.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = -502,692 - 0,002 \cdot \text{homok}^2 - 0,142 \cdot \text{homok} + 0,175 \cdot \text{CaCO}_3 - 3,867 \cdot \text{pH}^2 + 81,869 \cdot \text{pH} + 2,353 \cdot \text{agyag}^{-1} + 1305,132 \cdot \text{pH}^{-1} - 0,003 \cdot \text{CaCO}_3^2 + 0,005 \cdot \text{agyag}^2 - 0,356 \cdot \text{agyag} - 3,593 \cdot \ln(\text{por})$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 28,465 + 0,002 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} + 0,840 \cdot \ln(\text{humusz}) - 27,936 \cdot \text{por}^{-1} + 0,002 \cdot \text{agyag}^2 - 0,001 \cdot \text{homok}^2$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 24,653 + 0,557 \cdot \text{agyag} + 0,003 \cdot \text{por} \cdot \text{homok} - 5,354 \cdot \ln(\text{agyag}) - 2,708 \cdot \ln(\text{homok}) + 1,127 \cdot \ln(\text{humusz}) - 3,851 \cdot \text{agyag}^{-1} - 0,001 \cdot \text{CaCO}_3^2$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 3,659 + 0,002 \cdot \text{agyag}^2 - 0,012 \cdot \text{homok} - 11,050 \cdot \text{pH}^{-1} - 0,019 \cdot \text{CaCO}_3$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

A -33 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becslésénél a térfogattömeg nem szignifikáns független változó (LR2), ezért ebben az esetben ugyanazt a PTF-et kaptuk, mint az LR1 függvények esetén (4.34. táblázat). -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslésekor a térfogattömeget is figyelembe vevő regressziós egyenlet egyszerűbb lett (4.34. táblázat).

4.34. táblázat. A térfogattömeget is figyelembe vevő folytonos pedotranszfer függvények (LR2). A -33 kPa-hoz tartozó víztartó képesség becsléséhez a vizsgált minták esetén nem volt szignifikáns változó a térfogattömeg, ezért arra ennél a módszernél ugyanazt a becselő egyenletet kaptuk, mint az LR1 függvények esetén.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 66,812 - 10,733 \cdot \text{térfogattömeg}^2 + 0,120 \cdot \text{por} - 0,472 \cdot \ln(\text{homok}) - 0,001 \cdot \text{por}^{-2} - 0,023 \cdot \text{pH}^2$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 11,129 + 0,935 \cdot \text{agyag} + 0,416 \cdot \text{humusz} + 0,003 \cdot \text{por} \cdot \text{homok} - 8,885 \cdot \ln(\text{agyag}) - 2,696 \cdot \ln(\text{homok}) + 0,868 \cdot \ln(\text{humusz}) - 6,935 \cdot \text{agyag}^{-1} + 3,320 \cdot \text{térfogattömeg}^2 - 0,004 \cdot \text{agyag}^2 + 14,794 \cdot \text{térfogattömeg}^{-1}$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 3,230 + 0,002 \cdot \text{agyag}^2 - 0,013 \cdot \text{homok} + 0,170 \cdot \text{térfogattömeg}^2 - 10,075 \cdot \text{pH}^{-1} - 0,016 \cdot \text{CaCO}_3$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), térfogattömeg (g cm⁻³) szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %), pH_{H2O} és térfogattömeg.

A 4.35. és 4.36. táblázat mutatja a kidolgozott LR1 és LR2 regressziós egyenletek főbb statisztikai jellemzőit. Látható, hogy a módosított R² érték csak a -0,1 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becslése esetén nő nagy mértékben a térfogattömeg becslésben való figyelembevételével. Ezen a mátrixpotenciálon viszont a térfogattömeg nagyon meghatározó, mert ismeretével a víztartó képesség varianciája 76,2%-ban magyarázható, nélküle viszont csak 21,5 %-ban.

4.35. táblázat. A többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becselő modellek (LR1 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{10,1484} = 41,821	p < 0,0005	0,215
Víztartó képesség -33 kPa-on	F _{5,1489} = 278,146	p < 0,0005	0,481
Víztartó képesség -1500 kPa-on	F _{7,1487} = 239,838	p < 0,0005	0,528
Víztartó képesség -150000 kPa-on	F _{5,1489} = 524,882	p < 0,0005	0,637

4.36. táblázat. A térfogattömeget is figyelembe vevő többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becselő modellek (LR2 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{5,1489} = 956,444	p < 0,0005	0,762
Víztartó képesség -33 kPa-on [†]			
Víztartó képesség -1500 kPa-on	F _{10,1484} = 169,918	p < 0,0005	0,531
Víztartó képesség -150000 kPa-on	F _{6,1488} = 440,495	p < 0,0005	0,638

[†]A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanaz az egyenlet, mint az LR1 modell esetén.

A becslés pontosságának és megbízhatóságának ellenőrzése is hasonló eredményeket ad (4.37. és 4.38. táblázat). A -0,1 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becslési hibája szignifikánsan csökken (0,05 szignifikancia szinten ellenőrizve), ha a térfogattömeget is bevonjuk a becslésbe. A többi mátrixpotenciálon azonban nem szükséges az ismerete a víztartó képesség becsléséhez, mert nem javítja sem a becslés pontosságát sem a megbízhatóságát.

4.37. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési pontossága különböző mátrixpotenciálokon (a becslési hibák számítása a becslő adatbázisra).

Becslő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési pontosságot jellemző statisztikai hibák	$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	Mintaszaám
LR1	folytonosak	ME (tf%)	0,000	0,000	0,000	0,000	1495
		RME (%)	-0,75	-1,80	-6,40	-10,25	
		RMSE (tf%)	3,970	3,647	3,588	0,783	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,469**	0,695**	0,728**	0,799**	
LR2	folytonosak és térfogattömeg	ME (tf%)	0,000	†	0,000	0,000	1495
		RME (%)	-0,21	†	-6,27	-10,26	
		RMSE (tf%)	2,190	†	3,574	0,781	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,873**	†	0,731**	0,800**	

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H_2O} valamint térfogattömeg az LR2 modell esetén.

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

4.38. táblázat A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési megbízhatósága különböző mátrixpotenciálokon (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra).

Becslő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési hatékonyságot jellemző statisztikai hibák	$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	Mintaszaám
LR1	folytonosak	ME (tf%)	0,015	1,020	-0,701	-0,267	168
		RME (%)	-0,96	2,43	-9,98	-22,37	
		RMSE (tf%)	4,246	3,776	3,742	0,911	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,450**	0,650**	0,588**	0,714**	
LR2	folytonosak és térfogattömeg	ME (tf%)	1,746	†	-0,724	-0,267	168
		RME (%)	3,42	†	-10,02	-22,72	
		RMSE (tf%)	3,238	†	3,788	0,917	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,820**	†	0,585**	0,709**	

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H_2O} valamint térfogattömeg az LR2 modell esetén.

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

Az A és B szintekre (1296 db mintára) kidolgozott pedotranszfer függvények a 79. és 80. mellékletekben láthatók. A térfogattömeget input paraméterként nem tartalmazó PTF (LR1_AB) becslési pontosságát és megbízhatóságát a 4.39. és 4.40. táblázatok mutatják. A térfogattömeg nélküli (LR1_AB) egyenletet hasonlítottam össze a klasszifikációs fákkal (CRT3, CHAID2) (4.3.3.3. fejezet), mert így a becslések összehasonlítását nem zavarja az input paraméterek különbözősége. Mind a három módszer (CRT3, CHAID2, LR1_AB) ugyanazon a becslő adatbázison lett kidolgozva és ugyanazon a teszt adatbázison ellenőrizve. A csoportosítás nélkül kidolgozott folytonos pedotranszfer függvények eredményeivel mind a térfogattömeget tartalmazó, mind pedig a térfogattömeg nélküli becslő egyenletek becslési pontosságát és megbízhatóságát összevetettem (4.4.1. fejezet).

4.3.3.3. A módszerek összehasonlítása

A kidolgozott becslő módszerek (regressziós fa, CHAID, többszörös lineáris regresszió) becslési pontosságát és megbízhatóságát jellemző statisztikai mutatók a 4.39. és 4.40. táblázatokban láthatók.

Folytonos és kategória értékek

A pontosság vizsgálata során a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom kivételével mindig a folytonos értékek és altípus alapján becslő regressziós fa a pontosabb, -33 kPa mátrixpotenciálon szignifikánsan is jobb – a két módszer négyzetes eltérését 0,05 szignifikancia szinten vizsgálva –, mint a kategóriák alapján becslő (CRT_kat) (82. melléklet). A becslés azonban a kategóriák alapján kidolgozott regressziós fával megbízhatóbb – a -1500 kPa mátrixpotenciál nedvességtartalmának becslését kivéve, bár a két módszer között nincs szignifikáns különbség (86-90. mellékletek).

Regressziós fa (CRT) és CHAID

Ugyanazon kategória típusú input paraméterek alapján kidolgozott regressziós fa és CHAID típusú fa becslési eredményei nem különböznek egymástól szignifikánsan sem a pontosság, sem a megbízhatóság vizsgálata során (81-90. mellékletek). Minden esetben a regressziós fának jobb a pontossága. A megbízhatósága -33, -1500 és -150000 kPa-on a CHAID módszeré jobb, a regressziós fa a -0,1 kPa mátrixpotenciál nedvességtartalmának és a hasznosítható vízkészletnek a becslésében megbízhatóbb.

A CHAID modell struktúrája áttekinthetőbb, mint a regressziós módszeré, ezért a CHAID becslési eljárással könnyebben értelmezhető az adott mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség és a talajtulajdonságok kapcsolata.

Többszörös lineáris regresszió és regressziós fa módszer (CRT)

Sem a pontosság, sem a megbízhatóság szempontjából nem különböznek szignifikánsan a módszerek. A becslés pontossága -0,1 és -1500 kPa mátrixpotenciálon a többszörös lineáris regresszióval jobb, a -33, -150000 kPa mátrixpotenciálok nedvességtartalmát és a hasznosítható vízkészletet a regressziós fa becsli pontosabban (4.39. táblázat).

4.39. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott klasszifikációs fák (pedotranszfer szabályok) becslési pontossága különböző mátrixpotenciálokon (a becslési hibák számítása a becsülő adatbázisra).

Becslő módszer	Becsült tulajdonság	Becslő adatbázis		Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintaszám
		Tanuló adatok	Kereszt-validált adatok		
		RMSE (tf%)	RMSE ^a (tf%)		
CRT3 (folytonos tulajdonságok, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,006	4,143	0,464**	1296
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,514	3,719	0,675**	1296
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,500	3,662	0,715**	1296
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,719	0,789	0,806**	1296
	DV számított ^b	3,944	-	0,357**	1296
CHAID2 (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,021	4,092	0,457**	1296
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,822	3,891	0,597**	1296
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,707	3,867	0,672**	1296
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,834	0,885	0,728**	1296
	DV számított ^b	4,048	-	0,289**	1296
CRT_kat (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,003	4,134	0,465**	1296
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,821	3,877	0,597**	1296
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,622	3,848	0,690**	1296
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,794	0,884	0,757**	1296
	DV számított ^b	4,040	-	0,307**	1296
LR1_AB (folytonos tulajdonságok)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	3,989	-	0,470**	1296
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,539	-	0,669**	1296
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,499	-	0,715**	1296
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,735	-	0,796**	1296
	DV	4,020	-	0,294**	1296
	DV számított ^b	4,009	-	0,303**	1296

^aA tízszer kereszt-validált validáló adatbázisrészecskék átlagos négyzetes hibáinak gyöke, amit a CRT és CHAID módszerekre végeztem el.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becsült víztartó képességekből számolva

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Kategória típusú független változók: fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát tartalom és pH kód.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

4.40. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott pedotranszfer szabályok és pedotranszfer függvények becslési megbízhatósága (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra).

Becslő módszer	Becsült tulajdonság	Teszt adatbázis			Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintaszám
		ME (tf%)	RMSE (tf%)	RME (%)		
CRT3 (folytonos tulajdonságok, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,636	4,014	-2,09	0,418**	146
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,371	3,466	0,02	0,566**	146
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	-0,161	3,716	-5,82	0,589**	146
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,421	0,759	-3,65	0,755**	146
	DV számított ^b	0,532	4,023	-3,43	0,266**	146
CHAID2 (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,627	3,954	-2,07	0,447**	146
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,224	3,195	-0,43	0,644**	146
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	-0,105	3,540	-5,64	0,623**	146
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,020	0,779	-6,94	0,728**	146
	DV számított ^b	0,328	3,912	-4,51	0,300**	146
CRT_kat (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,611	3,948	-2,04	0,448**	146
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,131	3,269	-0,75	0,619**	146
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	-0,334	3,687	-6,83	0,597**	146
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	-0,075	0,863	-10,94	0,666**	146
	DV számított ^b	0,464	3,865	-3,28	0,354**	146
LR1_AB (folytonos tulajdonságok)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,900	3,965	-2,66	0,447**	146
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,749	3,361	1,31	0,620**	146
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	-0,279	3,411	-6,11	0,664**	146
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,248	0,792	6,19	0,771**	146
	DV	0,504	3,894	-3,65	0,316**	146
	DV számított ^b	1,028	4,023	-0,16	0,294**	146

*A korreláció 0,05 szinten szignifikáns.

** A korreláció 0,01 szinten szignifikáns.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becsléstől számolva

Kategória típusú független változók: fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát tartalom és pH kód.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

4.3.3.4. A csernozjom talajok víztartó képességében szerepet kapó tényezők értékelése

A térképi kategóriák határait alapul vevő CHAID módszer esetén mind a négy vizsgált mátrixpotenciálra a **fizikai féleség** a legfontosabb tulajdonság a víztartó képesség becsléséhez. Ahogy az előzőekben vizsgált talajcsoportoknál már láttuk és a szakirodalomból is jól ismert, minél finomabb a talajok fizikai félesége, annál nagyobb a víztartó képességük mátrixpotenciáltól függetlenül.

A **homoktartalom** a legfontosabb tulajdonság a -0,1 és -33 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó nedvességtartalom becsléséhez. Ahogyan az előző fejezetekben bemutatott talajcsoportok esetén, itt is a homoktartalom növekedésével csökken a víztartó képesség. Magas homoktartalmú minták víztartó képességének becsléséhez csak a homoktartalom szükséges (71. melléklet: 5. és 6. csomópont; 72. melléklet: 5. és 6. csomópont). Az **agyagtartalom** a -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség becsléséhez a legfontosabb a vizsgált tulajdonságok közül. Az említett mátrixpotenciál értékeken kívül még a -33 kPa értéken veszi figyelembe a becslő módszer. Minél több agyagot tartalmaz a minta, annál nagyobb a víztartó képessége (72-74. mellékletek).

A **humusztartalom** növekedésével a víztartó képesség is általában nő minden mátrixpotenciál értéken (72-74. és 76-78. mellékletek). Ez a csernozjom talajoknál is a humusztartalom szerkezetstabilizáló hatásával, és a szerves kolloidok nagymértékű vízmegkötő képességével magyarázható (Stefanovits et al., 1999). Ez alól a vizsgálatok során egy esetben volt kivétel: a vályog talajok $-0,1$ kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becslésénél (75. melléklet: 8. és 9. csomópont), ahol a 2,0%-nál több szerves anyagot tartalmazó talajok víztartó képessége átlagosan 1,3%-kal alacsonyabb. Ez a különbség ugyan szignifikáns a becslés során, de ezen a mátrixpotenciálon nem jelentős, ezért nem ad okot az elemzésre.

Kalcium-karbonát tartalom növekedése általában a víztartó képesség csökkenését okozza (71. melléklet: 3. és 4. csomópont; 74. melléklet: 15., 16., 21., 22., 25., 26., 33., 34., 39-42. csomópontok; 76. melléklet: 12. és 13. csomópont; 77. melléklet: 14. és 15. csomópont; 78. melléklet: 11-19. csomópontok). Egyedül a $-0,1$ kPa-hoz tartozó nedvességtartalom a kivétel, ahol a CHAID módszer esetén homokos vályog és agyagos vályog fizikai féleségű talajoknál a nagyobb kalcium-karbonát tartalmú talajok átlagos víztartó képessége nagyobb, mint a kisebb kalcium-karbonát tartalmúaké. Az ellentétes hatásra az adhat magyarázatot, hogy $-0,1$ kPa mátrixpotenciálon a kalcium-karbonát talajszerkezetre gyakorolt pozitív hatása érvényesül, mely több makropórust eredményez, alacsonyabb mátrixpotenciál értékeken viszont csökkenti a víztartó képességet (4.3.2.4. fejezet).

A **pH** érték csak a CHAID módszernél, -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom becslésénél fontos, ott homok fizikai féleségű talajok esetén az 5 feletti pH-jú talajok víztartó képessége alacsonyabb, vályog fizikai féleségűeké pedig magasabb. Ennek magyarázatához további vizsgálatok szükségesek.

A talaj **altípusát** a klasszifikációs fák egy eset kivételével: CRT, -33 kPa mátrixpotenciál (72. melléklet), mindig figyelembe veszik a csernozjom talajok víztartó képességének becsléséhez.

Feltalaj és altalaj megkülönböztetése a csernozjom talajoknál sem fontos a becslésben. Egyedül a -1500 kPa-on veszi figyelembe a CHAID módszer, a vályog fizikai féleségű 1,5%-nál nagyobb szerves anyag tartalmú talajoknál.

4.3.4. Réti talajok

4.3.4.1. Becslés klasszifikációs fákkal

A regressziós és CHAID típusú fa módszerekkel kidolgozott becslő modellek legfontosabb jellemzőit a 4.41. táblázat tartalmazza, amit a CRT_kat módszer kivételével (magyarázatot lásd a 4.2.4. fejezetben) a következőkben részletezek.

CRT3: folytonos értékek, altípus valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése alapján

-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Első lépésben a humusztartalom alapján válogatja szét a vizsgált talajszinthezt a regressziós fa (91. melléklet). A 3,06%-nál kisebb, vagy egyenlő humusztartalmú mintákat a portartalmuk, homoktartalmuk, altípusuk, kalcium-karbonát tartalmuk és agyagtartalmuk szerint csoportosítja tovább. A 3,06%-nál nagyobb szerves anyag tartalmúakat pedig ismét a humusztartalmuk alapján különíti el, majd ezeket a mintákat már nem osztályozza tovább, csak a szerves anyag tartalom szükséges a víztartó képesség becsléséhez.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Először a minták homoktartalma alapján választja ketté az adatokat a módszer (92. melléklet). A 30,20%-nál kisebb, vagy egyenlő homoktartalmú mintákat a pH, altípus, agyagtartalom, humusztartalom, homoktartalom, portartalom és kalcium-karbonát tartalom alapján különbözteti meg. 30,20%-nál nagyobb homoktartalom esetén a portartalom, pH érték, humusztartalom, altípus és agyagtartalom figyelembe vételével történik a csoportosítás.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Ezen a mátrixpotenciálon a vizsgált tulajdonságok közül az agyagtartalom a legfontosabb tulajdonság a víztartó képesség becsléséhez (93. melléklet). Az alacsonyabb ($\leq 24,04\%$) agyagtartalmú mintáknál a humusztartalom, homoktartalom és kalcium-karbonát tartalom alapján történik a további csoportképzés. A 24,04%-nál nagyobb agyagtartalmú minták esetén pedig a humusztartalom, altípus, pH, portartalom, homoktartalom és kalcium-karbonát tartalom figyelembe vételével.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

-150000 kPa-on is az agyagtartalom a legfontosabb a víztartó képesség becsléséhez (94. melléklet). 38,60%-nál kisebb, vagy egyenlő agyagtartalmú minták további csoportosítása az agyagtartalom, humusztartalom, kalcium-karbonát tartalom, pH és altípus alapján történik. A 38,60%-nál nagyobb agyagtartalmúaknál a kalcium-karbonát tartalom és az altípus ismerete szükséges.

CHAID2: kategóriák, altípus valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése alapján

-0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Ahogy a regressziós fánál, itt is a humusztartalom a legfontosabb tulajdonság a telített közeli (-0,1 kPa mátrixpotenciál) víztartó képesség becsléséhez (95. melléklet). A

humusztartalom alapján öt csoportot különböztet meg a módszer. Az első csoportot, ami az 1,25%-nál kisebb, vagy egyenlő humusztartalmú talajokat tartalmazza a fizikai féleség, kalcium-karbonát tartalom és pH kategóriák alapján csoportosítja tovább. A 1,5-2,0% szerves agyagot tartalmazó második csoportot a fizikai féleség alapján. A 2,0-3,5% szerves anyagot tartalmazó csoport (3.) talajait a fizikai féleség és kalcium-karbonát tartalom kategóriák alapján különíti el. A negyedik csoport a 3,5-4,0%, az ötödik csoport a 4,0%-nál nagyobb szerves agyagot tartalmazó talajokat tartalmazza. A negyedik és ötödik csoport nem kerül további felosztásra.

-33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Először a fizikai féleség alapján különíti el a módszer az adatokat hat csoportra (96. melléklet). A durva homok és homok fizikai féleségű minták alkotják az első csoportot, ezek nem kerülnek további felosztásra. A homokos vályog (2. csoport) talajokat a kalcium-karbonát tartalom kategóriák, a vályog talajokat (3. csoport) a humusztartalom és feltalaj és altalaj kategóriák, az agyagos vályog talajokat (4. csoport) a kalcium-karbonát, altípus és feltalaj és altalaj kategóriák, az agyag talajokat (5. csoport) a kalcium-karbonát tartalom és altípus kategóriák, a nehéz agyag talajokat (6. csoport) a humusztartalom kategóriák alapján különbözteti meg.

-1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

A talajokat első lépésben ezen a mátrixpotenciálon is a fizikai féleség alapján különbözteti meg a módszer, öt csoportot képezve (97. melléklet). A homokos vályog és az annál durvább fizikai féleségű szintek alkotják az első csoportot, a vályogok a másodikat, az agyagos vályogok a harmadikat, az agyagok a negyediket, a nehéz agyagok az ötödiket. Az első kettő és az ötödik csoportot a humusztartalom kategóriák alapján különít el további csoportokra. Az agyagos vályogoknál a kalcium-karbonát és humusztartalom kategóriák, az agyagos talajoknál a kalcium-karbonát tartalom kategóriák figyelembe vételével különbözteti meg.

-150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom

Ezen a mátrixpotenciálon ugyanazon hat csoportra különíti el a vizsgált mintákat, mint - 33 kPa mátrixpotenciál esetén (98. melléklet). A második (homokos vályogok) nem osztja tovább. Az első csoportot a kalcium-karbonát tartalom kategóriák, a harmadikat a kalcium-karbonát tartalom és pH kategóriák, a negyediket a kalcium-karbonát tartalom, humusztartalom és altípus kategóriák, az ötödiket a kalcium-karbonát tartalom, altípus és feltalaj és altalaj kategóriák, a hatodikat a kalcium-karbonát tartalom és altípus kategóriák alapján csoportosítja tovább.

4.41. táblázat. A klasszifikációs fával kidolgozott becslő módszerek (pedotranszfer szabályok) áttekintő táblázata

Becslés típusa	Becsült víztartó képesség	A becsléshez figyelmebe vett input paraméterek	Elkülönített csoportok száma
CRT3	$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	humusz, por, homok, altípus, kalcium-karbonát, agyag	13
	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	homok, pH, por, altípus, agyag, humusz, kalcium-karbonát	28
	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	agyag, humusz, homok, altípus, pH, por, kalcium-karbonát	19
	$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	agyag, humusz, kalcium-karbonát, altípus, pH	15
CHAID2	$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	humusz, fizikai féleség, kalcium-karbonát, pH kód	15
	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	fizikai féleség, kalcium-karbonát, humusz, feltalaj és altalaj megkülönböztetése, altípus	18
	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát kód	11
	$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	fizikai féleség, kalcium-karbonát, pH, altípus, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	24
CRT_kat	$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	humusz, fizikai féleség, kalcium-karbonát, altípus kód	13
	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	fizikai féleség, humusz, altípus, kalcium-karbonát, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	19
	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	fizikai féleség, humusz, altípus, kalcium-karbonát, feltalaj és altalaj megkülönböztetése és pH kód	30
	$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	fizikai féleség, kalcium-karbonát, pH, altípus, humusz, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	37

CHAID2: független változói kategória típusúak, melyek a térképi kódoknak felelnek meg, valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése. A talajtérképi kódok jelentése talajtulajdonságokként az 1-3. és 8. mellékletekben látható. CRT3: független változóként a CHAID modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus és az altalaj és feltalaj megkülönböztetése kivételével – folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) tartalmat és $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ -t.

4.3.4.2. Pedotranszfer függvények többszörös lineáris regresszióval

PTF az A, B és C szintek alapján

Az 4.42. és 4.43. táblázatok tartalmazzák a lineáris regresszióval kidolgozott becslő egyenleteket (PTF-eket). A minták agyag, por és humusztartalma mind a négy vizsgált mátrixpotenciál értéken fontos a víztartó képesség becsléséhez. A pH érték reciprokát és négyzetét a -33 és -150000 kPa mátrixpotenciálok víztartó képességét becslő PTF-ek tartalmazzák. A kalcium-karbonát tartalom a -150000 kPa nedvességtartalmának becsléséhez fontos.

4.42. táblázat. Folytonos pedotranszfer függvények a -0,1, -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékek becsléséhez azon talajtulajdonságok alapján, amik hasonlóak a részletes talajtérképeken található talajtulajdonságokhoz, de azokat folytonos értékekkel jellemzik (LR1).

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 54,637 + 1,796 \cdot \text{humusz} - 0,142 \cdot \text{homok} - 0,005 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} + 0,001 \cdot \text{agyag}^2 - 0,002 \cdot \text{agyag} \cdot \text{homok}$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 122,200 - 0,551 \cdot \text{homok} - 0,242 \cdot \text{pH}^2 + 0,714 \cdot \text{humusz} - 0,006 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} + 15,853 \cdot \text{por}^{-1} - 127,590 \cdot \text{pH}^{-1} - 0,003 \cdot \text{por}^2 - 7,407 \cdot \ln(\text{agyag}) - 3,180 \cdot \ln(\text{homok}) + 0,006 \cdot \text{agyag} \cdot \text{homok} - 1,303 \cdot \text{agyag}^{-1}$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 41,557 + 0,148 \cdot \text{agyag} + 1,111 \cdot \text{humusz} - 0,003 \cdot \text{homok}^2 + 3,879 \cdot \text{homok}^{-1} - 5,687 \cdot \ln(\text{por}) - 1,358 \cdot \ln(\text{agyag}) - 0,147 \cdot \text{humusz}^{-1}$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 10,413 + 0,001 \cdot \text{agyag}^2 - 0,055 \cdot \text{CaCO}_3 + 0,068 \cdot \text{humusz}^2 + 0,001 \cdot \text{CaCO}_3^2 - 0,246 \cdot \text{humusz} + 2,047 \cdot \text{por}^{-1} - 39,307 \cdot \text{pH}^{-1} - 0,041 \cdot \text{pH}^2$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

A -150000 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becslésénél a térfogattömeg nem szignifikáns független változó a térfogattömeget is figyelembe vevő (LR2) regressziós egyenletben (4.43. táblázat), ezért ebben az esetben ugyanazt a PTF, mint az LR1 függvények esetén. A térfogattömeg bevonásával (LR2) a becsléshez figyelembe vett független változók az LR1-hez képest módosulnak. -0,1 kPa-on a pH is fontossá válik. -33 kPa-on a humusztartalom nem szükséges, viszont a pH és a kalcium-karbonát tartalom igen. -1500 kPa-on pedig, nem szükséges a pH, viszont a homoktartalom igen.

4.43. táblázat. A térfogattömeget is figyelembe vevő folytonos pedotranszfer függvények (LR2). A -150000 kPa-hoz tartozó víztartó képesség becsléséhez a vizsgált minták esetén nem volt szignifikáns változó a térfogattömeg, ezért arra ennél a módszernél ugyanazt a becslő egyenletet kaptuk, mint az LR1 függvények esetén.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 93,771 - 44,965 \cdot \ln(\text{térfogattömeg}) - 0,001 \cdot \text{homok}^2 - 0,180 \cdot \text{pH}^2 - 117,234 \cdot \text{pH}^{-1} + 5,771 \cdot \text{por}^{-1} - 0,332 \cdot \ln(\text{humusz}) - 0,002 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} - 0,001 \cdot \text{por} \cdot \text{homok}$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = -16,416 - 0,403 \cdot \text{homok} + 120,877 \cdot \text{térfogattömeg}^{-1} - 0,222 \cdot \text{pH}^2 - 0,002 \cdot \text{por}^2 + 66,751 \cdot \ln(\text{térfogattömeg}) + 15,686 \cdot \text{por}^{-1} - 0,008 \cdot \text{agyag} \cdot \text{por} - 1,608 \cdot \ln(\text{homok}) - 117,590 \cdot \text{pH}^{-1} - 0,026 \cdot \text{CaCO}_3 + 0,442 \cdot \text{agyag}^{-1}$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = -21,801 + 0,086 \cdot \text{agyag} + 0,669 \cdot \text{humusz} - 0,003 \cdot \text{homok}^2 + 68,660 \cdot \text{térfogattömeg}^{-1} + 40,541 \cdot \ln(\text{térfogattömeg}) - 0,086 \cdot \text{CaCO}_3 + 0,001 \cdot \text{CaCO}_3^2 - 0,133 \cdot \text{humusz}^{-1} + 3,715 \cdot \text{homok}^{-1} - 5,877 \cdot \ln(\text{por})$$

A pedotranszfer függvények input paraméterei: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), térfogattömeg (g cm⁻³) szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

A 4.44. és 4.45. táblázatok tartalmazzák a kidolgozott regressziós egyenletek statisztikai mutatóit. A módosított R² értéke -0,1 kPa-on 213%-kal, -33 kPa-on 17%-kal javul akkor, ha bevonjuk a becslésbe a térfogattömeget is.

4.44. táblázat. A többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becslő modellek (LR1 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{5,1385} = 87,985	p < 0,0005	0,238
Víztartó képesség -33 kPa-on	F _{11,1379} = 103,096	p < 0,0005	0,447
Víztartó képesség -1500 kPa-on	F _{7,1383} = 192,521	p < 0,0005	0,491
Víztartó képesség -150000 kPa-on	F _{9,1381} = 304,330	p < 0,0005	0,663

4.45. táblázat. A térfogattömeget is figyelembe vevő többszörös lineáris regresszióval kidolgozott víztartó képességet becslő modellek (LR2 modell) szignifikancia vizsgálatának eredményei.

Függő változó	F	p	Módosított R ²
Víztartó képesség -0,1 kPa-on	F _{8,1382} = 507,786	p < 0,0005	0,745
Víztartó képesség -33 kPa-on	F _{11,1379} = 138,283	p < 0,0005	0,521
Víztartó képesség -1500 kPa-on	F _{10,1380} = 142,973	p < 0,0005	0,505
Víztartó képesség -150000 kPa-on†	-	-	-

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanaz az egyenlet, mint az LR1 modell esetén.

A 4.46. táblázat mutatja a lineáris regresszió becslési pontosságát, a 4.47. táblázat pedig a becslés megbízhatóságát. A térfogat becslésbe történő bevonásával a becslési pontosság a -0,1 és -33 kPa mátrixpotenciálokra javul szignifikánsan. A becslési megbízhatóság csak a -0,1 kPa mátrixpotenciálon jobb szignifikánsan a térfogattömeget is tartalmazó regressziós becslés esetén.

4.46. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési pontossága (a becslési hibák számítása a becslő adatbázisra) a különböző mátrixpotenciálokra (-0,1, -33, -1500 and -150000 kPa).

Becslő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési pontosságot jellemző statisztikai hibák	θ _{-0,1 kPa}	θ _{-33 kPa}	θ _{-1500 kPa}	θ _{-150000 kPa}	Mintaszám
LR1	folytonosak	ME (tf%)	0,000	0,000	0,000	0,000	1391
		RME (%)	-1,08	-2,66	-10,13	-16,68	
		RMSE (tf%)	4,830	5,081	4,890	1,096	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,491**	0,672**	0,703**	0,815**	
LR2	folytonosak és térfogattömeg	ME (tf%)	0,000	0,000	0,000	†	1391
		RME (%)	-0,37	-2,45	-9,89	†	
		RMSE (tf%)	2,793	4,730	4,816	†	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,864**	0,724**	0,713**	†	

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O} valamint térfogattömeg az LR2 modell esetén.

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

4.47. táblázat A víztartó képesség becslésére kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények becslési megbízhatósága (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra) a különböző mátrixpotenciálokon (-0,1, -33, -1500 and -150000 kPa).

Becslő módszer	Modell input paramétereinek típusa	Becslési hatékonyságot jellemző statisztikai hibák	$\theta_{-0,1}$ kPa	θ_{-33} kPa	θ_{-1500} kPa	$\theta_{-150000}$ kPa	Mintas szám
LR1	folytonosak	ME (tf%)	0,284	1,581	0,083	1,257	158
		RME (%)	-0,58	2,46	-6,49	-37,91	
		RMSE (tf%)	4,812	4,897	4,644	1,257	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,499**	0,694**	0,708**	0,813**	
LR2	folytonosak és térfogattömeg	ME (tf%)	0,566	1,496	0,193	†	158
		RME (%)	0,73	1,99	-4,99	†	
		RMSE (tf%)	3,056	4,949	4,635	†	
		Pearson féle korrelációs koefficiens	0,841**	0,680**	0,710**	†	

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H_2O} valamint térfogattömeg az LR2 modell esetén.

†A térfogattömeg nem volt szignifikáns független változó a regressziós becslésben, ezért ugyanazok az eredmények, mint az LR1 modell esetén.

Az A és B szintekre (1150 db mintára) kidolgozott pedotranszfer függvények a 99-100. mellékletben láthatók. A térfogattömeget input paraméterként nem tartalmazó PTF (LR1_AB) becslési pontosságát és megbízhatóságát a 4.48. és 4.49. táblázatok mutatják. Ahogyan a barna erdőtalajok és csernozjom talajok esetén is, a térfogattömeg nélküli (LR1_AB) egyenletet hasonlítottam össze a klasszifikációs fákkal (CRT3, CHAID2) (4.3.4.3. fejezet). A csoportosítás nélkül kidolgozott folytonos pedotranszfer függvények eredményeivel mind a térfogattömeget tartalmazó, mind pedig a térfogattömeg nélküli becslő egyenletek becslési pontosságát és megbízhatóságát összevetettem (4.4.1. fejezet) ezen talajcsoport esetén is.

4.3.4.3. A módszerek összehasonlítása

A víztartó képesség és hasznosítható vízkészlet becslésére kidolgozott módszerek becslési pontosságát és megbízhatóságát a 4.48. és 4.49. táblázatok mutatják.

Folytonos és kategória értékek

Minden becsült érték esetén pontosabbak a folytonos értékek alapján kidolgozott regressziós fák a kategóriák alapján kidolgozottaknál (101-105. mellékletek). -33 kPa-on a különbség szignifikáns (102. melléklet). A megbízhatóság vizsgálatánál a -33 kPa mátrixpotenciál kivételével minden esetben szintén a folytonos értékek alapján becsülő regressziós fa a jobb, de a különbségek egyik esetben sem szignifikánsak (106-110. mellékletek).

4.48. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott klasszifikációs fák (pedotranszfer szabályok) becslési pontossága különböző mátrixpotenciálokon (a becslési hibák számítása a becslő adatbázisra).

Becslő módszer	Becsült víztartó képesség	Becslő adatbázis		Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintaszám
		Tanuló adatok	Kereszt-validált adatok		
		RMSE (tf%)	RMSE ^a (tf%)		
CRT3 (folytonos tulajdonságok, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,592	4,950	0,533**	1150
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,333	5,110	0,735**	1150
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,585	5,113	0,707**	1150
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,077	1,160	0,814**	1150
	DV számított ^b	4,805	-	0,362**	1150
CHAID2 (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,697	4,869	0,501**	1150
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,808	5,024	0,659**	1150
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,968	5,095	0,642**	1150
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,185	1,269	0,768**	1150
	DV számított ^b	4,954	-	0,158**	1150
CRT_kat (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,722	4,889	0,493**	1150
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,787	5,011	0,663**	1150
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,747	5,124	0,681**	1150
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,150	1,264	0,784**	1150
	DV számított ^b	4,989	-	0,199**	1150
LR1_AB (folytonos tulajdonságok)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,761	4,761	0,480**	1150
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,961	4,961	0,631**	1150
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,874	4,874	0,659**	1150
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,073	1,073	0,815**	1150
	DV	4,802	-	0,235**	1150
	DV számított ^b	4,808	-	0,230**	1150

^aA tízszer kereszt-validált validáló adatbázisrészecskék átlagos négyzetes hibáinak gyöke, amit a CRT és CHAID módszerekre végeztem el.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becslő víztartó képességekből számolva.

**A korreláció 0,01 szignifikancia szinten megbízható.

Kategória típusú független változók: fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát és pH kód valamint a CTM2 esetén az altípus is.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

Regressziós fa (CRT) és CHAID

A kategóriák alapján történő becslésnél a regressziós fa és a CHAID módszer becslése nem különbözik egymástól szignifikánsan, sem a pontosság, sem a megbízhatóság vizsgálata során (101-110. mellékletek). A CHAID módszer pontossága a -0,1 kPa mátrixpotenciál nedvességtartalmának és a hasznosítható vízkészlet becslésében jobb, megbízhatósága a -0,1 és -150000 kPa mátrixpotenciálokon jobb, mint a regressziós fa módszeré.

Az optimalizált fák mérete a végső csoportok számát tekintve a regressziós fánál nagyobb, mint a CHAID típusú fánál, főként a -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciál értékeken (4.41. táblázat).

Többszörös lineáris regresszió és regressziós fa módszer (CRT)

A pontosság vizsgálata során a -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom kivételével a regressziós fa a pontosabb, -33 kPa mátrixpotenciálon a különbség szignifikáns a két módszer között (101-105. mellékletek). A becslések

megbízhatóságát tekintve nincs szignifikáns különbség a módszerek között (106-110. mellékletek). A -33 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom és a hasznosítható vízkészlet becslésénél a lineáris regresszió a megbízhatóbb, a -0,1, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokra a regressziós fa.

4.49. táblázat. A víztartó képesség becslésére kidolgozott pedotranszfer szabályok és pedotranszfer függvények becslési megbízhatósága (a becslési hibák számítása a teszt adatbázisra).

Becslő módszer	Becsült víztartó képesség	Teszt adatbázis			Pearson-féle korrelációs koefficiens	Mintaszám
		ME (tf%)	RMSE (tf%)	RME (%)		
CRT3 (folytonos tulajdonságok, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,387	5,162	-2,04	0,471**	121
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,169	5,869	-3,86	0,591**	121
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	-0,040	4,257	-7,37	0,752**	121
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	-0,003	1,091	-10,37	0,817**	121
	DV számított ^b	0,209	5,515	-47,61	0,101	121
CHAID2 (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,745	5,254	-2,84	0,453**	121
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,101	5,542	-4,12	0,640**	121
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	0,090	4,974	-7,93	0,637**	121
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,113	1,319	-10,92	0,721**	121
	DV számított ^b	0,010	4,828	-38,33	0,106	121
CRT_kat (kategóriák, altípus, altalaj és feltalaj elkülönítése)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,777	5,260	-2,90	0,453**	121
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,017	5,316	-4,251	0,678**	121
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	0,140	4,805	-7,015	0,671**	121
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,168	1,395	-8,69	0,687**	121
	DV számított ^b	-0,123	4,774	-38,180	0,205*	121
LR1_AB (folytonos tulajdonságok)	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	-0,902	5,186	-3,14	0,484**	121
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	0,050	5,224	-3,42	0,688**	121
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	0,218	4,431	-5,93	0,727**	121
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,243	1,252	-12,36	0,809**	121
	DV	-0,669	4,572	-43,34	0,257**	121
	DV számított ^b	-0,168	4,567	-38,08	0,230*	121

*A korreláció 0,05 szinten szignifikáns.

** A korreláció 0,01 szinten szignifikáns.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becslési víztartó képességekből számolva

Kategória típusú független változók: fizikai féleség, humusz, kalcium-karbonát és pH kód.

Folytonos független változók: agyag (<0,002 mm) (tömeg %), por (0,002-0,05 mm) (tömeg %), homok (0,05 – 2 mm) (tömeg %), szerves anyag (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}.

4.3.4.4. A réti talajok víztartó képességében szerepet kapó tényezők értékelése

Ahogy azt már a feljebb vizsgált talajcsoportoknál is láttuk, a talajok **fizikai félesége**, illetve mechanikai összetétele a legfontosabb tulajdonság a nem szikes réti talajok víztartó képességének becsléséhez is – csak a -0,1 kPa-on előzi meg a szerves anyag tartalom. A -33 kPa-on a **homoktartalom**, -1500 és -150000 kPa-on az **agyagtartalom** alapján osztja fel a talajokat a regressziós fa. A fizikai féleség, illetve mechanikai összetétel víztartó képességre gyakorolt hatása ezen talajoknál is megegyezik az előzőekben vizsgált talajoknál tapasztaltakkal (részletesebb elemzés a 4.3.2.4. fejezetben). -150000 kPa-on a magas agyagtartalmú minták víztartó képességének becsléséhez elegendő a minták agyagtartalmának ismerete (94. melléklet: 6. csomópont).

A talajtérképeken feltüntetett talajtulajdonságok közül a **humusztartalom** a legfontosabb a -0,1 kPa-hoz tartozó nedvességtartalom becsléséhez (91. és 95. mellékletek). -33 és -1500 kPa-on a mechanikai összetétel után a második legfontosabb tulajdonság. A nagyobb szerves anyag tartalmú mintáknak nagyobb a víztartó képessége (például: 91. melléklet: 1-6. csomópontok; 92. melléklet: 1,2. 19-22., 31., 32. csomópontok; 93. melléklet: 3., 4., 9-12. csomópontok)), ahogyan az előzőekben bemutatott talajcsoportoknál is. A humusztartalom és víztartó képesség közötti kapcsolat értelmezésénél réti talajok esetén is a csernozjom talajoknál (4.3.3.3) tett megállapítások érvényesek. Ez alól a vizsgálatok során -1500 kPa mátrixpotenciálon volt kivétel, ahol 3,38%-nál kisebb, vagy egyenlő humusztartalmú, 8,10-nél kisebb, vagy egyenlő pH értékű, 34,29%-nál nagyobb homoktartalmú és 24-28,28% agyagtartalmú minták esetén (93. melléklet: 35. és 36. csomópont), ahol a 1,2%-nál több szerves anyagot tartalmazó talajok víztartó képessége átlagosan 3,9%-kal alacsonyabb. Ahogy a barna erdőtalajoknál (4.3.2.4. fejezet), talán ebben az esetben is egy olyan egyéb talajtulajdonság okozhatja a víztartó képesség csökkenését, ami nem szerepel a vizsgált független változók között, de negatívan korrelál a szerves anyag tartalommal és a víztartó képességre gyakorolt negatív hatása dominál a szerves anyag pozitív hatása felett.

A **kalcium-karbonát tartalom** növekedése magasabb víztartó képességet eredményez -0,1 kPa-on (91. melléklet: 13., 14., 21., 22. csomópontok; 95. melléklet: 16-19. csomópontok). -33 kPa-on viszont a fizikai féleségtől függ, hogy milyen irányban befolyásolja a nedvességtartalmat. Homokos vályog fizikai féleség esetén még növeli (96. melléklet: 7. és 8. csomópont), agyagos vályog és agyag talajoknál viszont már csökkenti a növekvő kalcium-karbonát tartalom a víztartó képességet (96. melléklet: 11-16. csomópontok). Ennek magyarázata talán az lehet, hogy a homokos vályog talajoknál még a szerkezet javító hatása érvényesül, agyagos vályog és vályog talajoknál viszont az egységnyi talajtérfogat kisméretű pórusainak mennyiségét csökkenti (4.3.2.4. fejezet). -1500 kPa-on 5% feletti, -150000 kPa-on bármekkora kalcium-karbonát növekedés csökkenti a víztartó képességet. -150000 kPa-on a mechanikai összetétel után a második legfontosabb tulajdonság a víztartó képesség becsléséhez.

Azokban a csoportokban, ahol a **pH** meghatározó a víztartó képesség szempontjából, a nagyobb pH értékű talajoknak kisebb a víztartó képessége (92. melléklet: 3., 4., 17., 18., 53., 54. csomópontok; 93. melléklet: 17. és 18. csomópont; 94. melléklet: 21-24. csomópontok). Kivéve -0,1 kPa-on 10%-nál több kalcium-karbonátot tartalmazó agyagos vályog fizikai féleségű talajoknál, ahol 8,5-nél nagyobb pH esetén magasabb a víztartó képesség (95. melléklet: 20. és 21. csomópont). A két csoport átlagos víztartó képessége között 2,2 tf% a különbség, és a csoportok között nagy az átfedés, ezért a pH pozitív hatásának vizsgálata félrevezető lehet. Ebben az esetben felmerül, hogy talán érdemes lenne a CHAID módszer által elkülönített két csoport utólagos összevonása. A becslő módszerek kidolgozása során azonban a fa alakjának (elágazásainak) optimalizálásakor a módszer összevonás nélkül eredményezett megbízhatóbb becsléseket.

A regressziós fa esetén a lápos réti talaj típusos **altípusa** -0,1, -33 és -1500 kPa mátrixpotenciálon minden esetben a nagyobb víztartó képességgel rendelkező talajaltípusok között vannak a csoportosítás során (91. melléklet: 11. és 23. csomópont; 92. melléklet: 7. és 27. csomópont; 93. melléklet: 30. csomópont). Az öntés rétiak, pedig az említett mátrixpotenciálok mindig az alacsonyabb víztartó képességűek csoportjába

kerülnek (91. melléklet: 24. csomópont; 92. melléklet: 28. csomópont; 93. melléklet: 13. csomópont). Ez az egyezés talán a többi réti talajtól való szerkezetbeli eltérésükkel magyarázható. A lápos réti talajok szerkezete a magasabb szerves anyag tartalom hatására a réti talajoknál morzsalékosabb és lazább. Az öntés réti talajok szerkezete kevésbé fejlett, mint a többi réti talajé, legtöbbször gyengén szemcsés (Stefanovits et al., 1999). A CHAID vizsgálat és a -150000 kPa mátrixpotenciál esetén viszont már nem egyértelmű, hogy mikor melyik csoportba kerülnek (98. melléklet: 33., 35. és 38. csomópontok). Ennek talán az lehet az oka, hogy ezen a mátrixpotenciálon már az agyagásványok minősége a meghatározóbb. Az altípus becslésben betöltött szerepének értelmezése további vizsgálatokat igényel.

4.4. A talajok csoportosításának hatása a becslésre

4.4.1. A teljes adatbázisra és külön a talajcsoportokra kidolgozott pedotranszfer függvények eredményeinek összehasonlítása

Kiegészítendő a faktoranalízissel végzett vizsgálatokat, annak elemzésére, hogy a talajcsoportok kialakítása mennyiben befolyásolja a becslés pontosságát és megbízhatóságát, csoportosítás nélkül is kidolgoztam a pedotranszfer függvényeket (LR) és a pedotranszfer szabályokat (CRT) az A és B szintekre.

A lineáris regresszióval négyféleképpen dolgoztam ki a becsléseket:

- 1) LR1_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, független változói azon talajtulajdonságok, melyek a nagyméretarányú talajtérképeken fel vannak tüntetve, de azokat folytonos értékekkel jellemzik,
- 2) LR2_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a térfogattömeget is figyelembe vevő becslő módszer
- 3) LR3_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR1_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdoldhatóság-tartalmat is figyelembe vevő becslő módszer.
- 4) LR4_AB: A és B szintekre kidolgozott egyenletek, az LR2_AB módszer beviteli paraméterein kívül a vízdoldhatóság-tartalmat is figyelembe vevő becslő módszer.

A csoportosítás nélkül kifejlesztett folytonos pedotranszfer függvényeket a 111-114. melléklet mutatja, a talajcsoportonként kidolgozottak (külön-külön a szikes, barna erdő, csernozjom és réti talajokra) pedig a 31., 32., 59., 60., 79., 80., 99. és 100. mellékletekben láthatók. A kidolgozott módszerek becslési pontosságát a 4.50., megbízhatóságukat a 4.51. táblázat mutatja.

A csoportosítás nélkül és a talajcsoportokra lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvények becslési pontossága és megbízhatósága hasonló, a becslések négyzetes hibáit vizsgálva nincs szignifikáns különbség a két különböző eljárás között. A kisebb becslési hibát eredményező módszerek átlagos négyzetes eltérés értékét (RMSE) vastagítva kiemelttem a becslési pontosságot és megbízhatóságot összefoglaló táblázatokban (4.50. és 4.51. táblázatok).

Az adatbázis előzetes csoportosításának becslési pontosságra és megbízhatóságra való hatása eltérő a szakirodalmi adatokban (Pachepsky és Rawls, 2004). A becslési pontosság és megbízhatóság változását a csoportosítás hatására Pachepsky és Rawls (1999) munkájukban vizsgálták. Azt tapasztalták, hogy az előzetes csoportosítás ugyan a becslési pontosságot növelte, de a megbízhatóságra nem volt hatással.

Vizsgálataim eredménye a megbízhatóság tekintetében hasonló Pachepsky és Rawls (1999) megállapításaihoz. Eredményeim szerint a csoportosítás a víztartó képesség becslési pontosságát szintén növelte, de nem olyan mértékben, hogy ez szignifikáns különbséget eredményezzen a csoportosítás nélküli vizsgálatokhoz képest. A becslés megbízhatósága is kismértékben javult ugyan, de az eltérések itt sem voltak szignifikánsak.

4.50. táblázat. Talajcsoportok kialakításával és anélkül kidolgozott pedotranszfer függvények becslési pontossága talajcsoportonként vizsgálva (a becsülő adatbázison).

Talaj-csoportok	Becsült víztartó képesség	Becslés pontossága							
		Becslés térfogattömeggel				Becslés térfogattömeg nélkül			
		Összes adatra kidolgozott PTF		Talajcsoportonként kidolgozott PTF		Összes adatra kidolgozott PTF		Talajcsoportonként kidolgozott PTF	
		RMSE	Pearson-féle k.	RMSE	Pearson-féle k.	RMSE	Pearson-féle k.	RMSE	Pearson-féle k.
Szikes talajok	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	3,502	0,809**	3,222	0,841**	5,114	0,523**	4,731	0,608**
	n		562		574		562		574
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,599	0,701**	5,298	0,736**	5,899	0,682**	5,665	0,690**
	n		562		562		574		562
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,791	0,731**	4,621	0,750**	4,801	0,730**	4,680	0,743**
	n		574		574		574		574
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,344	0,773**	1,289	0,794**	1,344	0,773**	1,289	0,794**
	n		562		574		562		574
Barna erdőtalajok	DV	4,973	0,257**	4,789	0,331**	5,118	0,167**	4,953	0,219**
	n		562		562		562		562
	DV számított ^b	5,019	0,253**	4,821	0,315**	5,169	0,166**	4,960	0,218**
	n		562		562		574		562
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	2,745	0,841**	2,639	0,854**	4,974	0,270**	4,685	0,380**
	n		763		763		763		763
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,200	0,756**	4,100	0,765**	4,207	0,756**	4,182	0,754**
	n		763		763		763		763
Csernozjom talajok	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,626	0,776**	3,528	0,789**	3,609	0,779**	3,621	0,776**
	n		763		763		763		763
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,901	0,744**	0,821	0,771**	0,902	0,741**	0,829	0,766**
	n		763		763		763		763
	DV	4,332	0,396**	4,227	0,432**	4,453	0,322**	4,382	0,355**
	n		763		763		763		763
	DV számított ^b	4,311	0,408**	4,269	0,415**	4,436	0,336**	4,446	0,318**
	n		763		763		763		763
Csernozjom talajok	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	2,243	0,871**	2,168	0,877**	4,120	0,392**	3,989	0,470**
	n		1296		1296		1296		1296
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,738	0,642**	3,539	0,669**	3,599	0,664**	3,539	0,669**
	n		1296		1296		1296		1296
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,676	0,701**	3,499	0,715**	3,672	0,701**	3,499	0,715**
	n		1296		1296		1296		1296
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,744	0,792**	0,733	0,797**	0,745	0,791**	0,735	0,796**
	n		1296		1296		1296		1296
Réti talajok	DV	4,125	0,218**	3,946	0,346**	4,111	0,229**	4,020	0,294**
	n		1296		1296		1296		1296
	DV számított ^b	4,090	0,245**	4,009	0,303**	4,103	0,236**	4,009	0,303**
	n		1296		1296		1296		1296
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	2,889	0,851**	2,812	0,855**	4,836	0,454**	4,761	0,480**
	n		1150		1150		1150		1150
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,023	0,659**	4,619	0,692**	5,206	0,621**	4,961	0,631**
	n		1150		1150		1150		1150
Réti talajok	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,978	0,660**	4,872	0,659**	5,007	0,653**	4,874	0,659**
	n		1150		1150		1150		1150
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,108	0,805**	1,073	0,815**	1,110	0,805**	1,073	0,815**
	n		1150		1150		1150		1150
	DV	4,754	0,286**	4,683	0,319**	4,839	0,216**	4,802	0,235**
	n		1150		1150		1150		1150
	DV számított ^b	4,780	0,286**	4,737	0,294**	4,843	0,214**	4,808	0,230**
	n		1150		1150		1150		1150

*A korreláció 0,05 szinten szignifikáns.

** A korreláció 0,01 szinten szignifikáns.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becsült víztartó képességekből számolva

4.51. táblázat. Talajcsoportok kialakításával és anélkül kidolgozott pedotranszfer függvények becslési megbízhatósága talajcsoportonként vizsgálva (a teszt adatbázison).

Talaj- csoportok	Becsült víztartó képesség	Becslés megbízhatósága							
		Becslés térfogattömeggel				Becslés térfogattömeg nélkül			
		Összes adatra kidolgozott PTF		Talajcsoporton- ként kidolgozott PTF		Összes adatra kidolgozott PTF		Talajcsoporton- ként kidolgozott PTF	
		RMSE	Pearson- féle k.	RMSE	Pearson- féle k.	RMSE	Pearson- féle k.	RMSE	Pearson- féle k.
Szikes talajok	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	2,874	0,895**	3,197	0,888**	5,587	0,418**	5,093	0,554**
	n		70		70		70		70
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,566	0,743**	4,289	0,794**	4,956	0,667**	4,406	0,749**
	n		70		70		70		70
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,562	0,749**	4,484	0,768**	4,554	0,749**	4,533	0,757**
	n		70		70		70		70
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,405	0,806**	1,205	0,823**	1,405	0,806**	1,205	0,823**
	n		70		70		70		70
Barna erdőtálajok	DV	4,939	0,315**	5,034	0,263**	5,207	0,171	5,031	0,386*
	n		70		70		70		70
	DV számított ^b	4,897	0,355**	4,842	0,364**	4,770	0,392**	5,001	0,252*
	n		70		70		70		70
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	2,817	0,875**	2,396	0,882**	4,906	0,391**	4,883	0,407**
	n		81		81		81		81
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,418	0,833**	4,052	0,831**	4,377	0,828**	4,121	0,836**
	n		81		81		81		81
Csernozjom talajok	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,141	0,719**	4,015	0,738**	4,111	0,723**	4,185	0,720**
	n		81		81		81		81
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,810	0,682**	0,886	0,663**	0,813	0,677**	0,910	0,668**
	n		81		81		81		81
	DV	4,636	0,506**	4,285	0,534**	5,109	0,365**	4,821	0,394**
	n		81		81		81		81
	DV számított ^b	4,825	0,492**	4,307	0,505**	4,768	0,389**	4,809	0,383**
	n		81		81		81		81
Csernozjom talajok	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	2,526	0,850**	2,156	0,871**	3,914	0,442**	3,965	0,477**
	n		146		146		146		146
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,581	0,588**	3,361	0,620**	3,367	0,596**	3,361	0,620**
	n		146		146		146		146
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,667	0,631**	3,411	0,664**	3,701	0,627**	3,411	0,664**
	n		146		146		146		146
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,803	0,757**	0,801	0,772**	0,802	0,755**	0,792	0,771**
	n		146		146		146		146
Réti talajok	DV	3,994	0,262**	3,885	0,368**	3,961	0,235**	3,894	0,316**
	n		146		146		146		146
	DV számított ^b	3,911	0,280**	4,023	0,294**	4,223	0,210*	4,023	0,294**
	n		146		146		146		146
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	3,317	0,827**	3,284	0,828**	5,288	0,423**	5,186	0,484**
	n		121		121		121		121
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,123	0,712**	4,891	0,742**	5,589	0,680**	5,224	0,688**
	n		121		121		121		121
Réti talajok	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,318	0,758**	4,379	0,734**	4,301	0,758**	4,431	0,727**
	n		121		121		121		121
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,430	0,798**	1,252	0,809**	1,433	0,795**	1,252	0,809**
	n		121		121		121		121
	DV	4,458	0,348**	4,430	0,325**	4,483	0,288**	4,572	0,257**
	n		121		121		121		121
	DV számított ^b	4,399	0,362**	4,517	0,279**	4,586	0,305**	4,567	0,230*
	n		121		121		121		121

*A korreláció 0,05 szinten szignifikáns.

** A korreláció 0,01 szinten szignifikáns.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becült víztartó képességekből számolva

4.4.2. A teljes adatbázisra és külön a talajcsoportokra kidolgozott regressziós fák eredményeinek összehasonlítása

A szikes talajok vizsgálatához újabb regressziós fák kidolgozása volt szükséges, mind a csoportosítás nélkül, mind a külön szikes talajokra kidolgozott becslés esetén. Az újabb fák kidolgozását a következők indokolták:

- szikes talajok esetén a sótartalmat is figyelembe vettem a becslések kidolgozása során (mivel az elsődleges cél a talajtérképek információja alapján történő becslés volt), tehát a sótartalmat is figyelembe vevő csoportosítás nélküli regressziós fa kidolgozása is szükséges volt;
- a módszerfejlesztés során a klasszifikációs fáknál a C szinteket is figyelembe vettem a becsléshez, a többi talajcsoportnál viszont már nem, ezért a szikes talajcsoportra csak az A és B szintek figyelembe vételével is kidolgoztam a regressziós fát.

Így a csoportosítás előnyei és hátrányai a szikes talajokon is vizsgálhatóvá váltak. A szikesekre kidolgozott regressziós fa (CRT) független változói: talaj altípus, agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalom (tömeg %), humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) és vízdoldhatóság-tartalom (tömeg %), valamint $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. A szikes talajokra lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvény (LR3_AB) független változói: agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalom (tömeg %), humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) és vízdoldhatóság- tartalom (tömeg %), valamint $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$.

A többi talajcsoportnál, a sótartalmat nem tartalmazó összes talajra kidolgozott regressziós fát hasonlítottam a talajcsoportonként kidolgozottakhoz (4.3.2.1., 4.3.3.1., 4.3.4.1. fejezetekben bemutatott módszerek).

A CRT modell független változóként a talaj altípusát, az altalaj és feltalaj megkülönböztetését, az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát tartalmat (tömeg %) és $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ -t. Az LR1_AB modell független változói: agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalom (tömeg %), humusz tartalom (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$.

A teljes adatbázisra kidolgozott regressziós fák főbb jellemzői a 115. és 116. mellékletekben láthatók.

A kidolgozott módszerek pontosságát jellemző RMSE és a mért és becsült értékek közötti Pearson-féle korrelációt a 4.52. táblázat mutatja, a megbízhatóságát jellemző statisztikai vizsgálatokat pedig a 4.53. táblázat. A kétféle módszer közül a kisebb RMSE értékűt vastag betűvel jelöltem, mind a pontosság (4.52. táblázat), mind a megbízhatóság vizsgálatánál (4.53. táblázat).

A pontosság vizsgálata során a talajcsoportonként kidolgozott regressziós fa a húsz esetből három esetben szignifikánsan jobb, mint az egész adatbázis (csoportosítás nélkül) alapján kifejlesztett. Szikes talajok -33, -150000 kPa és réti talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képessége esetén pontosabb a csoportokra kidolgozott CRT. A csoportosítás nélkül kidolgozott regressziós fa csak egy esetben eredményezett szignifikánsan pontosabb eredményeket, a csernozjom talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslésekor. A módszerek

megbízhatósága minden esetben hasonló, nincs szignifikáns különbség a becslés négyzetes hibáját tekintve a csoportosítás nélkül és a külön talajcsoportokra kidolgozott módszerek között.

4.52. táblázat. Talajcsoportok kialakításával és anélkül kidolgozott regressziós fák (CRT: folytonos változók és altípus alapján) becslési pontossága talajcsoportonként vizsgálva (a becslő adatbázison).

Talajcsoportok	Becsült víztartó képesség	Becslés pontossága			
		Összes adatra kidolgozott CRT3		Talajcsoportonként kidolgozott CRT3	
		RMSE	Pearson-féle k.	RMSE	Pearson-féle k.
Szikes talajok	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,630	0,635**	4,725	0,609**
	n		574		574
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,569	0,719**	4,861	0,793**
	n		574		574
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,447	0,772**	4,440	0,772**
	n		574		574
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,342	0,775**	1,189	0,828**
	n		574		574
Barna erdőtalajok	DV számított ^b	5,027	0,302**	5,097	0,354**
	n		574		574
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,614	0,422**	4,649	0,397**
	n		763		763
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,957	0,786**	3,996	0,788**
	n		763		763
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,364	0,812**	3,291	0,820**
	n		763		763
Csernozjom talajok	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,788	0,797**	0,756	0,810**
	n		763		763
	DV számított ^b	4,230	0,450**	4,486	0,455**
	n		763		763
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	3,847	0,527**	4,006	0,464**
	n		1296		1296
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,499	0,686**	3,514	0,675**
	n		1296		1296
Réti talajok	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,163	0,778**	3,500	0,715**
	n		1296		1296
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,696	0,820**	0,719	0,806**
	n		1296		1296
	DV számított ^b	3,944	0,361**	3,944	0,357**
	n		1296		1296
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,682	0,511**	4,592	0,533**
	n		1150		1150
Réti talajok	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,831	0,669**	4,333	0,735**
	n		1150		1150
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,711	0,693**	4,585	0,707**
	n		1150		1150
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,059	0,821**	1,077	0,814**
	n		1150		1150
	DV számított ^b	4,922	0,284**	4,805	0,362**
	n		1150		1150

*A korreláció 0,05 szinten szignifikáns.

** A korreláció 0,01 szinten szignifikáns.

^bHasznosítható vízkészlet (DV) a becslés víztartó képességeiből számolva

4.53. táblázat. Talajcsoportok kialakításával és anélkül kidolgozott regressziós fák (CRT: folytonos változók és altípus alapján) becslési megbízhatósága talajcsoportonként vizsgálva (a teszt adatbázison).

Talajcsoportok	Becsült víztartó képesség	Becslés megbízhatósága			
		Összes adatra kidolgozott CRT		Talajcsoportonként kidolgozott CRT	
		RMSE	Pearson-féle k.	RMSE	Pearson-féle k.
Szikes talajok	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	5,550	0,433**	5,575	0,420**
	n		70		70
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,277	0,640**	5,734	0,619**
	n		70		70
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,472	0,762**	4,486	0,753**
	n		70		70
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,241	0,810**	1,205	0,822**
	n		70		70
Barna erdőtalajok	DV számított ^b	5,115	0,270*	6,119	0,246*
	n		70		70
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,950	0,418**	5,100	0,322**
	n		81		81
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	4,623	0,814**	4,372	0,814**
	n		81		81
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,468	0,668**	4,560	0,663**
	n		81		81
Csernozjom talajok	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,800	0,722**	0,815	0,675**
	n		81		81
	DV számított ^b	5,289	0,279*	4,597	0,515**
	n		81		81
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	4,227	0,348**	4,014	0,418**
	n		146		146
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	3,653	0,535**	3,466	0,566**
	n		146		146
Réti talajok	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	3,721	0,608**	3,716	0,589**
	n		146		146
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	0,734	0,774**	0,759	0,755**
	n		146		146
	DV számított ^b	4,270	0,194*	4,023	0,266**
	n		146		146
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	5,194	0,463**	5,162	0,471**
	n		121		121
	$\theta_{-33\text{kPa}}$	5,189	0,704**	5,869	0,591**
	n		121		121
	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	4,191	0,763**	4,257	0,752**
	n		121		121
	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	1,121	0,813**	1,091	0,817**
	n		121		121
	DV számított ^b	4,929	0,243**	5,515	0,101
	n		121		121

*A korreláció 0,05 szinten szignifikáns.

** A korreláció 0,01 szinten szignifikáns.

4.5. A vizsgált talajtulajdonságok szerepe a becslésben

A következőkben áttekintem, hogy a nagyméretarányú térképeken és a hozzájuk tartozó kartogramokon szereplő talajtulajdonságok milyen irányban befolyásolják a talajok víztartó képességét. A talajtulajdonságok és a víztartó képesség kapcsolatát a talajcsoportok vizsgálatainál elemeztem (a 4.3.1.2., 4.3.2.4., 4.3.3.4. és 4.3.4.4. fejezetekben), ezért ezekre itt részletesen nem térek ki, a különböző talajcsoportok közötti hasonlóságokat és különbségeket emelem ki. Az elemzést a folytonos értékeket és a talaj altípusát figyelembe vevő regressziós fák (CRT) és a térképi kategóriákra kidolgozott CHAID típusú fák alapján végzem.

4.5.1. Fizikai féleség

A víztartó képesség becsléséhez általában a talajok fizikai félesége a legfontosabb, ez az első csoportosító tulajdonság a klasszifikációs fáknál szinte minden mátrixpotenciálon és vizsgált talajcsoporton. Ez alól a -0,1 kPa-hoz tartozó víztartó képesség becslése a kivétel a *barna erdőtalajok* és *réti talajok* esetén. A szakirodalomnak megfelelően, ahogy a durva homok fizikai féleségtől haladunk a nehéz agyagig, a talaj egyre több vizet képes visszatartani bármely szívóerőn.

4.5.2. Mechanikai összetétel

Amikor az **agyagtartalom** az első szinten szerepel a klasszifikációs fában, tehát az elsődleges csoportképző, a több agyagot tartalmazó talajnak mindig nagyobb a víztartó képessége. Ha a csoportképzés a **homoktartalom** alapján kezdődik, akkor pedig a kisebb homoktartalmú talajoknak nagyobb a víztartó képessége. Ez a két jelenség talajtípustól és szívóerőtől függetlenül mindig igaz a csoportkialakítás kezdeténél. A portartalom (0,002-0,5 mm) hatása viszont nem ilyen egyértelmű még akkor sem, ha ez alapján kezdődik a csoportképzés. Egy bizonyos portartalom növekedésig a víztartó képesség is növekszik, de azt átlépve már csökken.

Bizonyos mátrixpotenciál értékeken a nagy homoktartalmú minták esetén elégséges a mechanikai összetétel, kategóriák esetén pedig a fizikai féleség ismerete. A kidolgozott becslő fák szintjeinek száma általában a homokos vályog, vályog, vályogos agyag fizikai féleségű minták esetén a legnagyobb, tehát ezen talajok esetén a legösszetettebb a becslés. Ennek több oka is lehet. A nagyon homokos, illetve a nagyon agyagos talajoknál a mechanikai összetétel víztartó képességre gyakorolt hatása valószínűleg dominál a többi talajtulajdonság hatása felett. A homokos vályog, vályog, vályogos agyag fizikai féleségű minták szerkezeti változatossága is nagyobb lehet (Nemes szóbeli közlés, 2011), amit a magasabb mátrixpotenciál értékeken (-0,1, -33 kPa) – szerkezetre vonatkozó információ – hiányában a többi talajtulajdonsággal próbál leírni a regressziós fa.

4.5.3. Humusztartalom

A humusztartalmat a becslő módszerek nagy része figyelmebe veszi a víztartó képesség számításához. A szerves anyag tartalmat többek között Rawls és munkatársai (1982, 1983, 2003, 2004, 2006), Rajkai (1988) Wösten és munkatársai (1999) is fontosnak találták a becsléshez. A humusztartalom hatása valószínűleg azért nem jelenik meg a csernozjom és barna erdőtalajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének a becslésében

(CRT3, LR1_AB), mert ezen talajcsoportoknál az agyagtartalom szórása jóval nagyobb, mint a humusztartalomé (Rab et al., 2011). A humusztartalomnak a *szikes talajcsoport* és a *nem szikes réti talajok* víztartó képességének becslésében van a legnagyobb jelentősége. Ez azzal magyarázható, hogy a réti talajok esetén a legnagyobb a becslés kidolgozásához használt minták humusztartalmának a variabilitása.

4.5.4. Kalcium-karbonát tartalom

A kalcium-karbonát tartalom hatása főtípusonként, illetve mátrixpotenciálonként más. *Szikes talajok* esetén mátrixpotenciáltól függetlenül egy bizonyos mennyiségen felüli növekedése hatására csökken a víztartó képesség. *Barna erdőtalajoknál* viszont a kalcium-karbonát tartalom növekedése egy bizonyos értékig általában pozitív irányba befolyásolja a víztartó képességet és csak azon felüli további kalcium-karbonát tartalom növekedése hatására csökken a minták átlagos nedvességtartalma. A kismértékű kalcium-karbonát növekedés még a cementáló hatást erősíti, aminek következtében stabilabbak az aggregátumok, jobb a talaj porozitása. A magas értékek viszont már mészgöbcecsek jelenlétére utalnak, amik a gravitációs pórusteret növelik a kapilláris póruster rovására, nem tartják meg a vizet, a talaj egy jó részét elfoglalják (Rajkai szóbeli közlés, 2011), ezáltal erősen csökkentik a víztartó képességet. A kalcium-karbonát tartalmat Rajkai (2004) a szikes talajok, Khodaverdiloo és Homae (2004) nagy kalcium-karbonát tartalmú talajok víztartó képességének becsléséhez találta fontosnak.

4.5.5. pH érték

A pH érték a szikes talajok és barna erdőtalajok víztartó képességének becsléséhez fontos talajtulajdonság. *Szikeseknél* -0,1 és -33 kPa mátrixpotenciálon a pH növekedése negatívan hat a víztartó képességre. Ebben az esetben a magasabb pH a kedvezőtlenebb oszlopos szerkezetre utalhat. Az oszlopos tömődött szerkezet szinte nem is tartalmaz gravitációs és kapilláris méretű pórusokat, amik mennyisége meghatározza a talajok víztartó képességét az említett mátrixpotenciálokon. -150000 kPa-on viszont bizonyos esetekben a magasabb pH nagyobb víztartó képességet eredményez. Itt talán a pH növekedése a növekedő Na-telítettségre utalhat, ezen talajtulajdonságok közötti közel lineáris összefüggést Stefanovits et al. (1999, 115-116. oldalon) is leírja. A kicserélhető Na tartalom növekedésével pedig nő a talajszemcsék felületén adszorbeálódott víz mennyisége. *Barna erdőtalajoknál* a nagyobb pH értékek eredményeznek nagyobb víztartó képességet, ami azzal magyarázható, hogy a savanyú talajok szerkezetére a tömődött, kevés makropórust tartalmazó szerkezet a jellemző (Stefanovits et al., 1999), emiatt alacsonyabb a víztartó képességük. Hodnett és Tomasella (2002) szintén figyelembe vette a talajok pH értékét a víztartó képesség becsléséhez mérsékeltövi és trópusi talajoknál. Vizsgálataik alapján feltételezik, hogy a talaj pH értéke a mállási indikátora. A trópusi talajok mállásának előrehaladottsága pedig utal a lehetséges agyagásvány összetételre, valamint a talaj szerkezetére.

4.5.6. Sótartalom

Szikes talajok esetén a vízdoldhatóság-tartalom is befolyásolja a -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességet. Növekedésével csökken a víztartó képesség. Ez a tömött, kedvezőtlen szerkezet és a peptizáció következménye lehet, amik nagymértékben csökkentik, leszűkítik a makropórusok mennyiségét (azon pórusok

menyiségét, amik elsősorban határozzák meg a talaj víztartó képességét $-0,1$ kPa mátrixpotenciálon). A csoportosítás nélkül kidolgozott sótartalmat is figyelembe vevő regressziós fák esetén, a -1500 és -150000 kPa nedvességpotenciálhoz tartozó víztartó képesség értékek becslésében a vízzoldhatósó-tartalom a mechanikai összetétel és humusztartalom utáni legfontosabb tulajdonság. A nagyobb sótartalmú minták átlagos víztartó képessége nagyobb. Az alacsonyabb és magasabb víztartó képességű csoportok határa $0,025$ - $0,045\%$ sótartalomnál van (a csoport pontos határa a többi talajtulajdonságtól függ). Az alacsony mátrixpotenciálok a sókristályok vízfelvevő képességével magyarázható a vízzoldhatósó-tartalom víztartó képességre gyakorolt hatása. A talajok sótartalmát Rajkai (1988) is fontosnak találta szikes minták -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becsléséhez.

4.5.7. A talaj altípus szerepe

A talaj altípus figyelembe vétele a becslési eljárásban javítja a -33 , -1500 és -150000 kPa-hoz tartozó víztartó képesség becslésének pontosságát és megbízhatóságát is, amit a *szikes talajok* esetén mutattam be. Ez a tény rávilágít a talaj altípus által hordozott információk fontosságára. A talaj altípus a vizsgálati eredmények szerint tehát olyan információt hordoz, ami a vizsgálatba vont talajjellemzők jelentéstartalmát bővíti. Az is kiderült, hogy az altípusban kifejezésre jutó tulajdonág együttes jelentősége altípusonként és mátrixpotenciálonként is változhat. Érdekes volna a későbbiekben részletesen is megvizsgálni, hogy az egyes talaj altípusok változataira jellemző részletes talajtulajdonságok tágabb körének (pl. szerkezet, agyagásvány típusa, stb.) vizsgálatba vonása után is megmarad-e az altípus ilyen jellegű szerepe. Azt mindenestre vizsgálataim igazolják, hogy a talaj altípus – illetve az altípus által közvetített talajgenetikai tulajdonság együttes – jelentősége a talaj vízgazdálkodásában közvetlenül az egyébként legfontosabbnak tartott fizikai féleség után, a szerves anyag tartalom és kalcium-karbonát tartalommal hasonló fontosságú lehet a szikes és barna erdőtalajok esetén (4.1-4.4. ábra).

4.5.8. Feltalaj és altalaj megkülönböztetése

Wösten és munkatársai (1999), valamint Lilly és munkatársai (2008) eredményeivel ellentétben a feltalaj és altalaj megkülönböztetése egyik vizsgált talajcsoportnál sem igazán fontos. Csak néhány esetben szerepel a becslésben, de akkor is a klasszifikációs fák alsóbb szintjein. A becslésben a bevont input paraméterek közül az altalaj és feltalaj megkülönböztetésének a legkisebb a szerepe (4.1-4.4. ábrák, 115. és 116. mellékletek) A MARTHA adatbázis mintáinak nagy része művelt területekről származik. Ezen mintáknál a különböző agrotechnikai eljárások hatására a feltalaj (szántott réteg) jellegzetes szerkezete és az ebből adódó talaj vízgazdálkodásbeli különbségek megváltoznak, aminek következtében kevésbé különbözik a feltalaj az altalajtól.

4.5.9. Térfogattömeg

A többszörös lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvényeknél a térfogattömeg mind a négy talajcsoport esetén szignifikánsan növelte a $-0,1$ kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslési pontosságát és megbízhatóságát. Térfogattömeg ismerete nélkül ezen mátrixpotenciál nedvességtartalma a Pearson-féle korrelációs koefficiens tekintve jóval gyengébben becsülhető, mint a többi vizsgált mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom. A többi vizsgált mátrixpotenciál becslésének

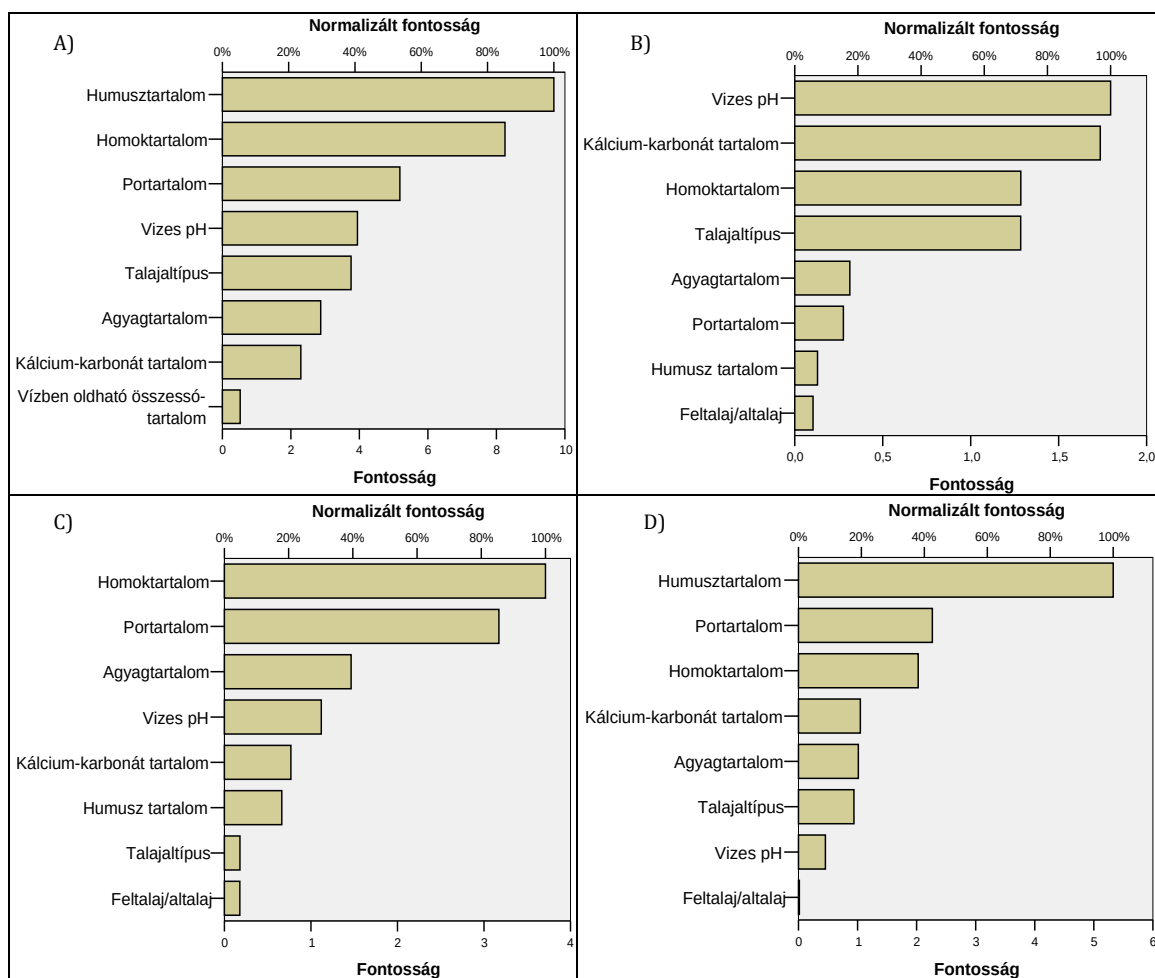
eredményességét azonban nem befolyásolta szignifikánsan. Nemes (2003) és Twarakavi és munkatársai (2009) vizsgálatai is azt mutatják, hogy a térfogattömeg ismerete javítja a víztartó képesség becslésének pontosságát a nagyobb mátrixpotenciál értékeken. A pontbecslő pedotranszfer függvényekben adott mátrixpotenciál víztartó képességének becsléséhez a talaj térfogattömegét többek között Minasny és munkatársai (1999), Pachepsky és munkatársai (1999), Nemes (2003), Rajkai (2004) és Lamorski és munkatársai (2008) vették figyelembe.

4.6. A víztartó képesség becslésének jellegzetességei a különböző mátrixpotenciál értékeken

A talajtulajdonságok becslésben betöltött szerepét a folytonos értékek és a talaj altípusa alapján kidolgozott regressziós fák eredményei segítségével illusztrálom. Az ábrákon a talajtulajdonságok becslésben betöltött szerepe, fontossága látható. A módszer a fontosság számításánál a fában szereplő összes felosztás alapján adja meg, hogy a talajtulajdonságok mennyiben járulnak hozzá az adatbázis homogénebb csoportokra osztásához, tehát mekkora mértékkel csökkentik az adatbázis varianciáját a felosztások során.

4.6.1. Maximális vízkapacitás

A **maximális vízkapacitás ($\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$)** becslése esetén talajcsoportonként eltérő, hogy a talajtérfékeken található tulajdonságok közül melyik a legfontosabb (4.1. ábra).



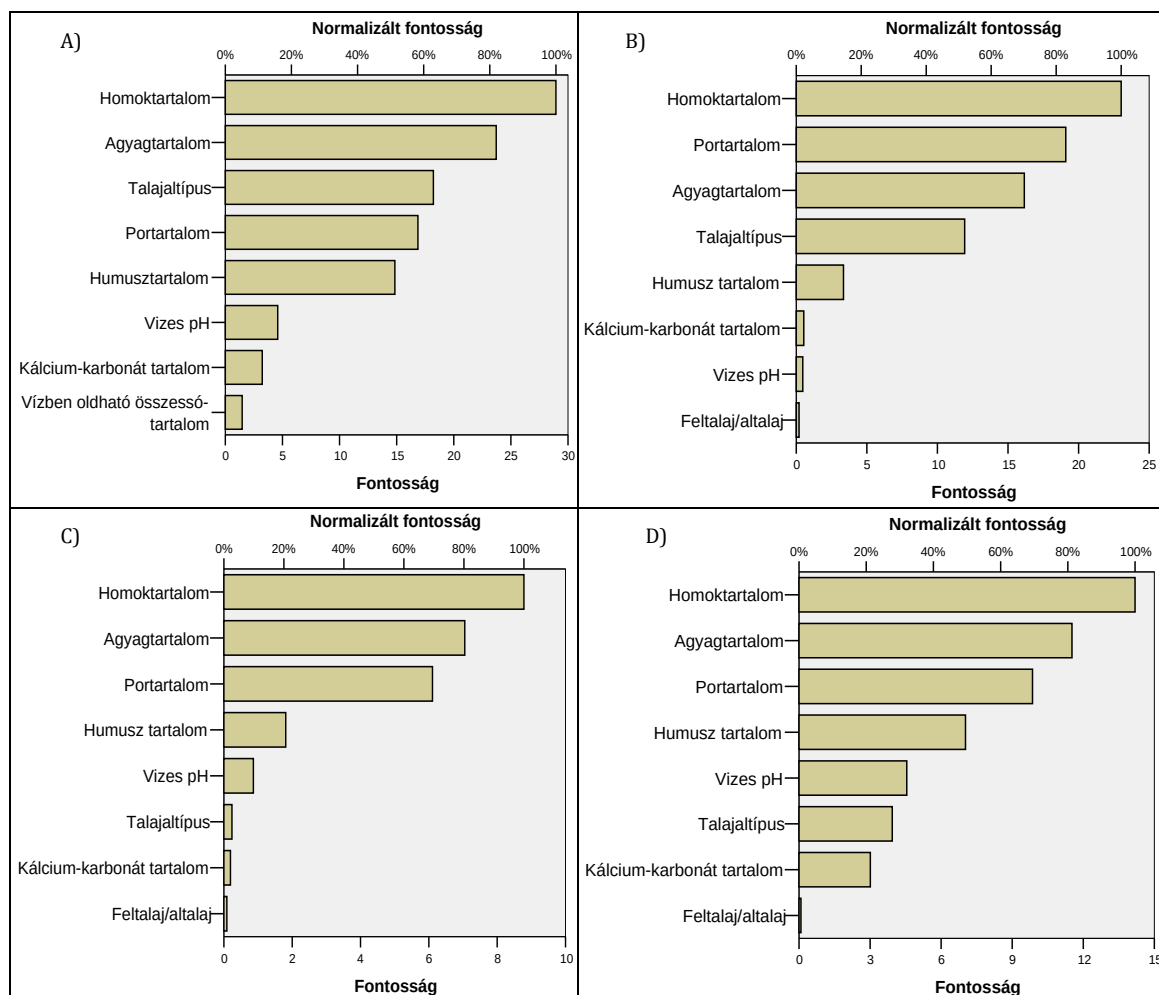
4.1. ábra. A talajtulajdonságok szerepe a $-0,1 \text{ kPa}$ mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslésében (a folytonos talajtulajdonságokat és talaj altípust figyelembe vevő regressziós fa modell számításai alapján). A: szikes talajcsoport, B: barna erdőtalajok csoportja, C: csernozjom talajok csoportja, D: réti talajok csoportja.

A szikeseknél a CHAID módszernél a fizikai féleség, a regressziós fáknál (CRT) a szerves anyag tartalom a legmeghatározóbb tulajdonság a becslésben. A barna erdőtalajoknál a

CHAID módszer esetén a kalcium-karbonát tartalom, a folytonos értékeknél a pH az első csoportképző tulajdonság. A nem szikes csernozjom talajok esetén viszont a fizikai féleség, illetve a homoktartalom. A nem szikes réti talajoknál kategóriáknál (CHAID) és folytonos értékeknél (CRT) egyaránt a humusztartalom a legmeghatározóbb. A -0,1 kPa mátrixpotenciál nedvességtartalma a térképeken feltüntetett talajtulajdonságok egyikével sem mutatott szoros kapcsolatot. Becslésének pontossága és megbízhatósága nagymértékben javul a térfogattömeg ismeretével.

4.6.2. Szabadföldi vízkapacitás

A -33 kPa-hoz tartozó víztartó képesség becsléséhez a vizsgált talajtulajdonságok közül a homoktartalom a legmeghatározóbb független változó a folytonos értékek vizsgálatakor (CRT) (4.2. ábra). Ahogyan azt a barna erdőtalajoknál említettem (4.3.2.4. fejezet), ez az eredmény megfelel a szakirodalmi adatoknak, mely szerint a -3 és -200 kPa mátrixpotenciál tartományban a finom homokfrakció a meghatározó a víztartó képesség szempontjából, mert ez a szemcsefrakció határozza meg a gravitációs és kapilláris pórusterek nagyságát (Rajkai et al., 1981; Várallyay, 2002b).

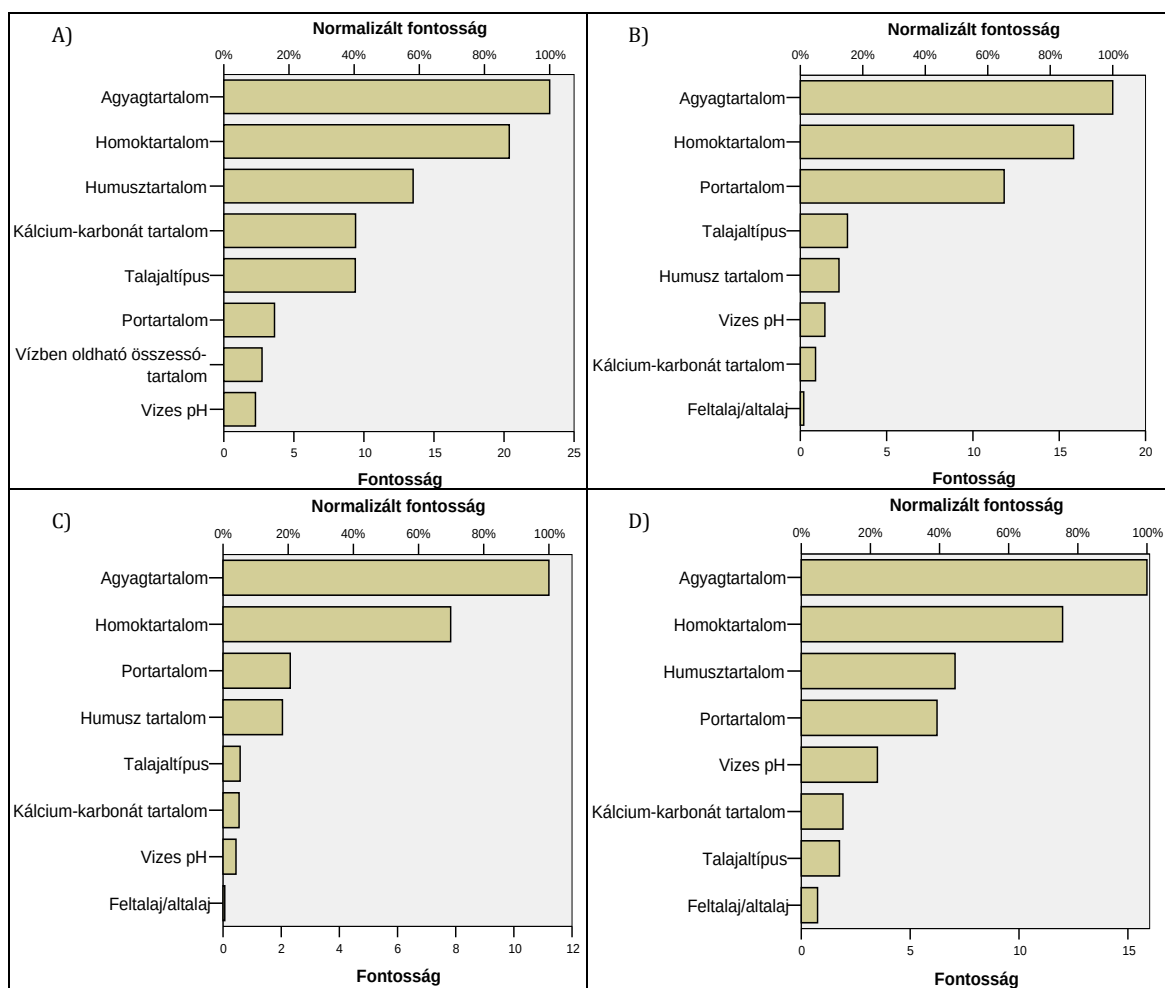


4.2. ábra. A talajtulajdonságok szerepe a -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslésében (a folytonos talajtulajdonságokat és talaj altípust figyelembe vevő regressziós fa modell számításai alapján). A: szikes talajcsoport, B: barna erdőtalajok csoportja, C: csernozjom talajok csoportja, D: réti talajok csoportja.

A növekvő homoktartalom csökkenő víztartó képességet eredményez. Kategória típusú független változók esetén (CHAID) a fizikai féleség a legfontosabb tulajdonság, melynek víztartó képességre gyakorolt hatása megegyezik a szakirodalmi adatokkal.

4.6.3. Alacsony mátrixpotenciálok víztartó képessége

Amennyiben folytonos értékek is rendelkezésre állnak a **-1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokhoz** tartozó nedvességtartalom becsléséhez mind a 4 vizsgált talajcsoport esetén – barna erdőtalajok, nem szikes csernozjomok, szikes talajok, nem szikes réti talajok – az agyagtartalom a legfontosabb tulajdonság (4.3. és 4.4. ábra). Ennek az az oka, hogy a magasabb szívótartományban már csak a kisebb mikropórusokban található nedvesség, aminek a nagyságát elsősorban az agyagtartalom határozza meg.

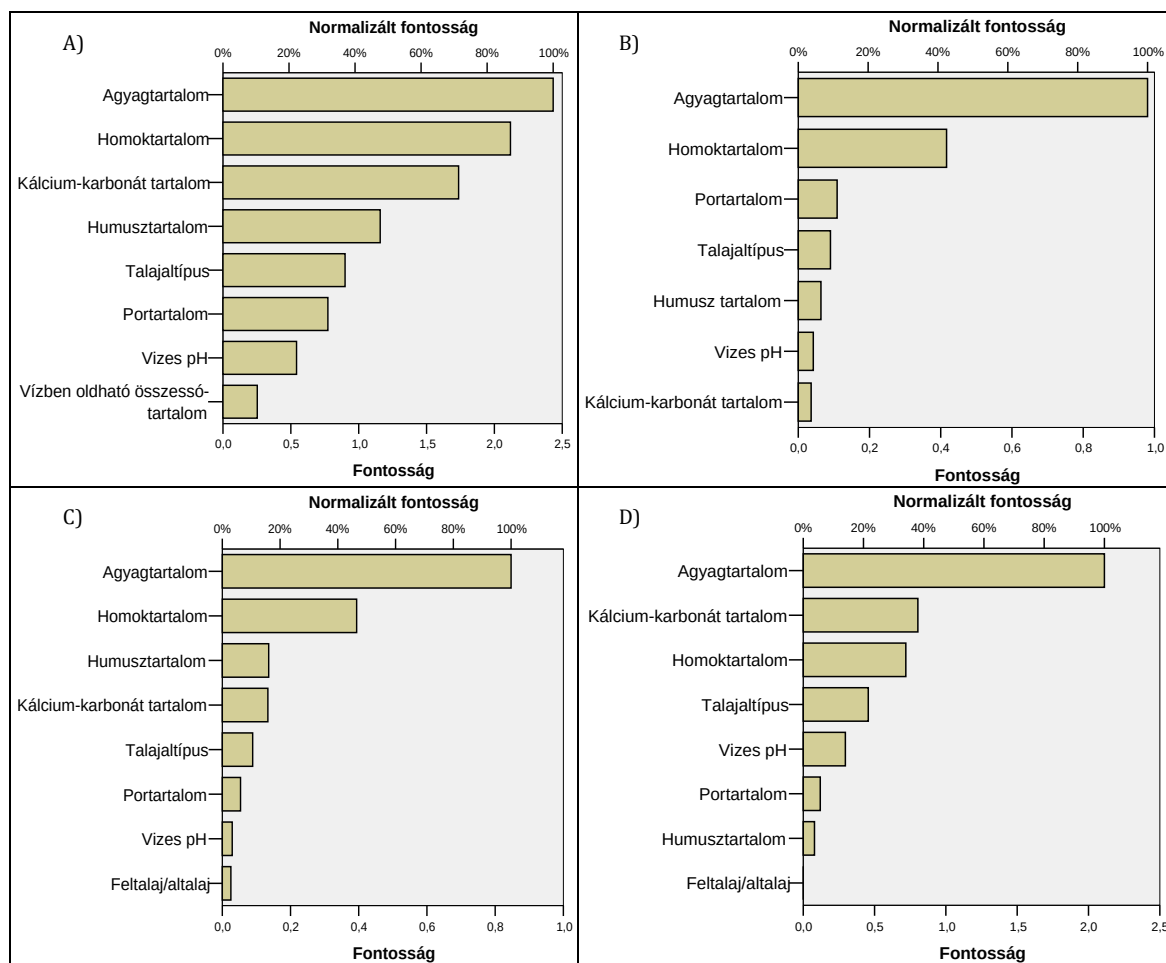


4.3. ábra. A talajtulajdonságok szerepe a -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslésében (a folytonos talajtulajdonságokat és talaj altípust figyelembe vevő regressziós fa modell számításai alapján). A: szikes talajcsoport, B: barna erdőtalajok csoportja, C: csernozjom talajok csoportja, D: réti talajok csoportja.

Minél nagyobb a talaj agyagtartalma, annál több nedvességet tud visszatartani. A -200 kPa mátrixpotenciálnál kisebb tartományban már csak a szorpciós erővel kötött víz van jelen a talajban, melynek mennyiségét leginkább az agyagtartalom befolyásolja (Rajkai et al., 1981; Várallyay, 2002b). A szorpcióval visszatartott víz mennyisége pedig a talajrészecskék felületétől függ, ami főként az agyagtartalommal jellemezhető, de fontos még a duzzadó agyagásványok mennyisége is, a rétegrácsok között visszatartott víz mennyisége miatt.

Ennek a vízmennyiségnek a jelentősége a vízzel telített talaj állapotában elenyésző, de -1500 és főként -150000 kPa-on már jelentős. A víztartó képesség becsléséhez az agyagásványok minőségének figyelembe vételére többek között Bruand (1990) is felhívta a figyelmet. Bruand szerint erre akkor van szükség, amikor a becsléshez eltérő alapközetben, különböző talajfejlődéssel kialakult talajokat vizsgálunk. Kimutatta, hogy a -1500 kPa és -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom jobban jellemezhető az agyagásvány minőségére utaló tulajdonságok bevonásával, mint csupán az agyagtartalom alapján. A későbbiekben, amennyiben erre lehetőség nyílik, hasznos lenne a talaj víztartó képességének ilyen irányú vizsgálata is a fa módszerekkel.

Kategória típusú független változók esetén (CHAID) a fizikai féleség a legfontosabb tulajdonság az alacsony mátrixpotenciálok víztartó képességének becsléséhez.



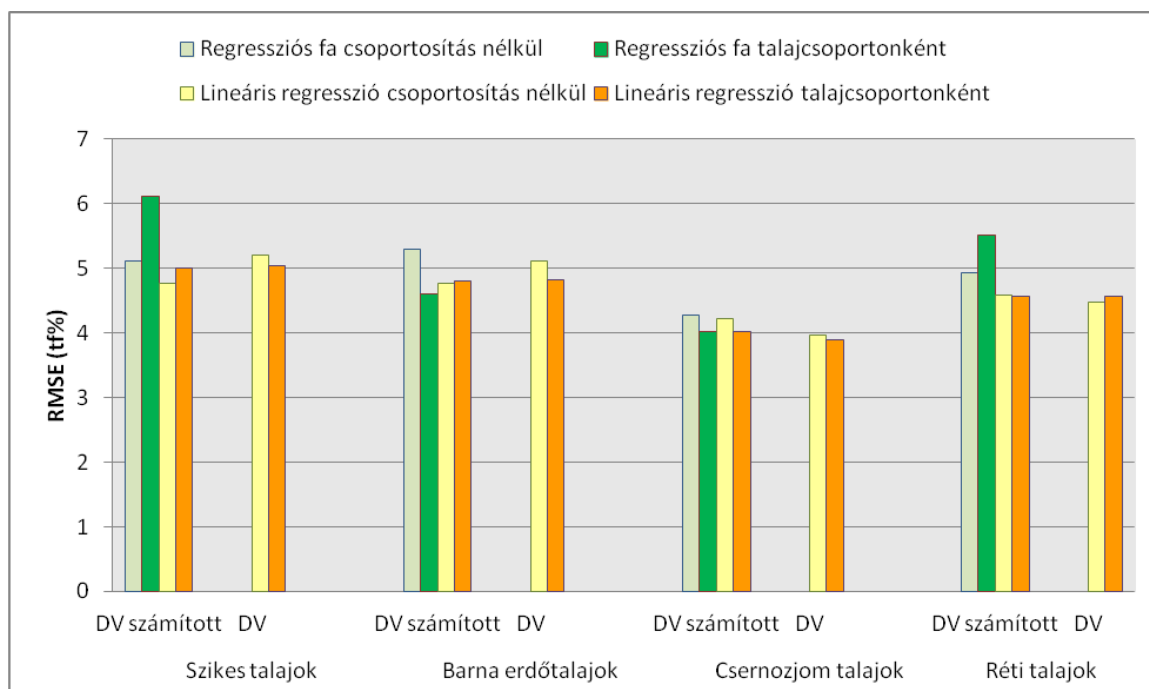
4.4. ábra. A talajtulajdonságok szerepe a -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslésében (a folytonos talajtulajdonságokat és talaj altípust figyelembe vevő regressziós fa modell számításai alapján). A: szikes talajcsoport, B: barna erdőtalajok csoportja, C: csernozjom talajok csoportja, D: réti talajok csoportja.

4.6.4. Hasznosítható vízkészlet

A nagyméretarányú talajtérképeken és kartogramokon feltüntetett információk alapján a **hasznosítható vízkészlet** becslése (CHAID1) minden vizsgált talajcsoport esetén bizonytalan és abban az esetben sem javul, ha kategória értékek helyett folytonos értékek alapján történik a becslése. A hasznosítható vízkészlet dolgozatban bemutatott becslése azonban a szakirodalomban található módszerekhez hasonló; folytonos talajtulajdonságok

alapján a megbízhatóság vizsgálata során 3,89-6,12 tf% a becslések RMSE értéke (4.5. ábra). Minasny és munkatársai (1999) több különböző módszerrel is becsülték ausztrál talajok víztartó képességét. A becslés megbízhatóságának vizsgálata során az RMSE értéke 6,25-11,52 tf% volt. A mesterséges neurális hálózattal becsült szabadföldi vízkapacitás és holtvíztartalom alapján számított hasznosítható vízkészlet esetén volt a legkisebb eltérés a mért és becsült értékek között.

Batjes (1996) globális léptéken vizsgálta, hogy pedotranszfer függvénnyel (PTF) vagy pedotranszfer szabállyal (PTSZ) pontosabb-e a becslése. Eredményei azt mutatták, hogy a pedotranszfer szabályokkal becsült hasznosítható vízkészlet értékek a megbízhatóbbak. Dolgozatomban a lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvényekkel vizsgáltam, hogy a hasznosítható vízkészlet közvetlen becslése, vagy a becsült -33 és -1500 kPa nedvességtartalmak alapján való számítása a pontosabb és megbízhatóbb. A vizsgált adatbázis alapján a hasznosítható vízkészlet közvetlen becslése és becsült víztartó képesség adatokból való számítása sem a pontosság sem a megbízhatóság vizsgálatánál nem különbözött egymástól szignifikánsan.



4.5. ábra. A talajcsoportonként és csoportosítás nélkül kidolgozott közvetlenül és közvetetten becsült hasznosítható vízkészlet megbízhatósága. (RMSE: átlagos négyzetes eltérés (tf%). DV számított: a becsült -33 és -1500 kPa mátrixpotenciál értékek nedvességtartalmából számított hasznosítható vízkészlet; DV: közvetlen becsült.)

A hasznosítható vízkészlet becslésének eredményességét főként az gátolja, hogy kapcsolata a mechanikai összetétellel összetettebb, mint a mechanikai összetétel és az adott mátrixpotenciálok nedvességtartalmának kapcsolata. Számítását a -33 és -1500 kPa mátrixpotenciálok víztartó képességei alapján végezzük (Stefanovits et al., 1999), melyek az agyatartalommal állnak a legszorosabb kapcsolatban (Minasny et al., 1999). Lipsius (2002) 11 db szakirodalomban fellelhető pont és görbebecslő pedotranszfer függvény alkalmazásával vizsgálta a hasznosítható vízkészlet számításának megbízhatóságát bajor talajokon. A becsült és mért értékek közötti kapcsolatot jellemző determinációs koefficiens

(R^2) 0,07 és 0,87, az RMSE 10,59 és 41,06 t $\text{f}\%$ között változott. Minden módszer esetén azt tapasztalta, hogy a pedotranszfer függvények az alacsonyabb hasznosítható vízkészletű talajoknál felül becsülnek, magasabb hasznosítható vízkészlet esetén pedig alul becsülnek. Erre Minasny és munkatársai (1999) ausztrál talajokon végzett vizsgálatai adhatnak magyarázatot. Megállapították, hogy az agyagtartalom és a hasznosítható vízkészlet kapcsolata gyenge és nem lineáris. 25% agyagtartalomig a növekvő agyagtartalom mérsékelten növeli a hasznosítható vízkészlet mennyiségét, 25% felett pedig már mérsékelten csökkenti.

A hasznosítható vízkészlet megbízhatóbb becsléséhez egyéb talajtulajdonságok figyelembe vétele is szükséges lenne, amire a talajtérképek alapján történő becslés során nincs lehetőségünk. A későbbiekben érdemes lenne megvizsgálni, hogy milyen módszerrel és mely talajtulajdonságok bevonásával javítható becslésének pontossága és megbízhatósága.

4.7. A különböző becslő módszerek alkalmazásának tapasztalatai

Az összes vizsgált talajcsoport eredményeit figyelembe véve általánosan megállapítható, hogy abban az esetben, ha a becslést a talaj altípusa, mechanikai összetétele, szervesanyag-tartalma, kalcium-karbonát tartalma, és pH értéke alapján végezzük, **a regressziós fákkal (pedotranszfer szabályokkal) hasonló pontosságú becsléseket kaphatunk, mint a többszörös lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvényekkel.**

A vizsgált talajokon **nem eredményezett szignifikáns javulást a becslés megbízhatóságában, ha kategória típusú független változók helyett folytonos értékeket vettem figyelembe a víztartó képesség becsléséhez.** Ugyanakkor a becslési pontosság a húsz összehasonlított esetből ötször a folytonos értékek alapján volt jobb.

A talajtérképeken található kategória típusú talajtulajdonságok alapján történő víztartó képesség becslés pontossága a szakirodalomban publikált becslő módszerekéhez hasonló, ami 4-5 tf% közötti (Pachepsky és Rawls, 1999; Wösten et al., 2001; Nemes, 2003; Minasny et al., 2004; Lamorski et al., 2008; Twarakavi et al., 2009; Nemes et al., 2010). Tehát elmondható, hogy **hazai talajaink víztartó képessége becsülhető a nemzetközi szakirodalomban elfogadott hibaértékeken belüli pontossággal és megbízhatósággal** (a négyzetes eltérés gyökét (RMSE) tekintve) **a nagymératarányú talajtérképek kategória információi alapján.**

A dolgozatban kidolgozott regressziós fák mérete a végső csoportok számát tekintve általában nagyobb, mint a szakirodalomban fellelhető regressziós fák esetén. Az optimális klasszifikációs fák végső csoportjainak száma csökkenthető utólagos szignifikancia vizsgálatok alapján, a csoportok összevonásával azonban a talajtulajdonságok és a víztartó képesség kapcsolata nehezebben vizsgálható. Mivel dolgozatom célkitűzései között hazai talajaink víztartó képességének számítása mellett az összefüggések jellemezése is szerepelt, a csoportok utólagos összevonását nem végeztem el. A továbbiakban, a becslési eljárás egyszerűsítése érdekében, azonban megfontolandó lehet a végső csoportok számának csökkentése metszési eljárás alkalmazásával (Breiman et al., 1998).

Vizsgálataim alapján látható (4.2. és 4.3. fejezet), hogy a víztartó képesség becslés relatív hibája (RME) általában a mátrixpotenciál csökkenésével növekszik (-150000 kPa-on a legnagyobb). Ezt Rajkai és Várallyay (1992) is megállapították. A nagyobb relatív hibának talán az lehet az oka, hogy a higroszkópos nedvességtartalom meghatározása általában nagyobb relatív hibával jár, mint a magasabb mátrixpotenciálok nedvességtartalmáé.

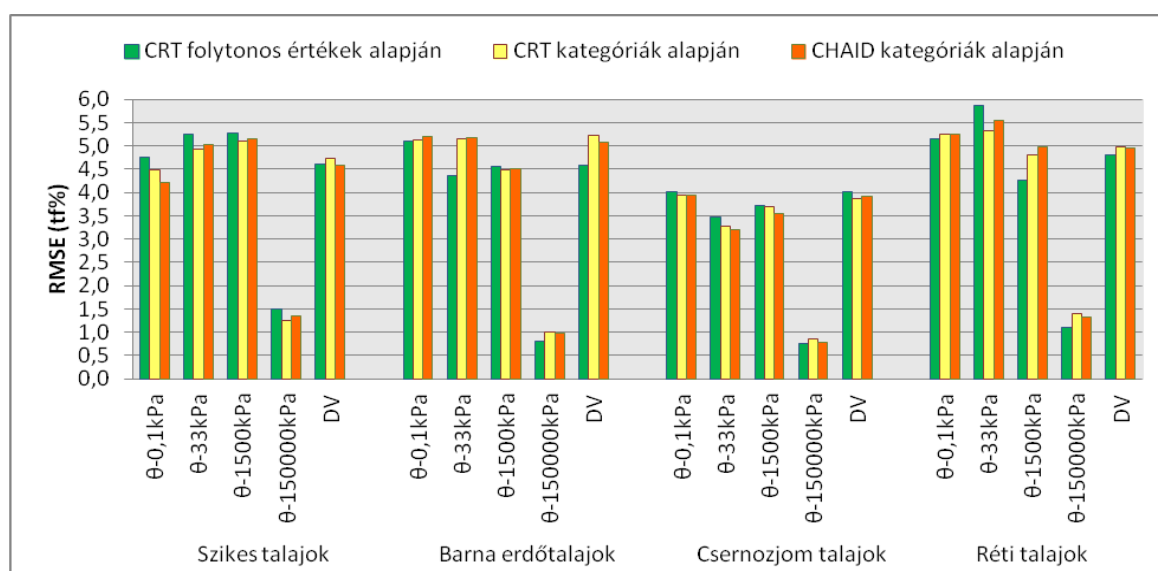
Várallyay és Rajkai (1992), Pachepsky és munkatársai (1996) és Nemes (2003) által hazai talajokra kidolgozott pontbecslő pedotranszfer függvények a -250 és -10 kPa tartományban eredményezték a legpontatlanabb becsléseket. Ezt azzal magyarázzák, hogy ebben a tartományban a fizikai féleségen és térfogattömegén kívül egyéb talajtulajdonságoknak is van hatása a víztartó képesség alakulására. Ez a megállapítás a dolgozatomban bemutatott térfogattömeget is figyelembe vevő lineáris regresszióval becsült víztartó képesség értékekre esetén is igaz (4.50. és 4.51. táblázatok).

Pachepsky és munkatársai (1996) továbbá azt is megállapították, hogy a lineáris regresszió a víztartó képességet leíró görbe két végpontján ad pontosabb becslést, a közte lévő szakaszban viszont a mesterséges neurális hálózat a hatékonyabb. Erre az adhat magyarázatot, hogy az újabb módszerek a komplex kapcsolatokat is le tudják írni, a lineáris

regresszió viszont csak egy irányban tudja vizsgálni a függő és független változók közötti kapcsolatokat. A dolgozatomban bemutatott klasszifikációs fák és többszörös lineáris regresszió becslési pontossága és megbízhatósága a legtöbb esetben nem különbözött egymástól szignifikánsan.

4.7.1. Kategória típusú input paraméterek

A kategória típusú talajtulajdonságok alapján kidolgozott regressziós (CRT_kat) és CHAID típusú fák becslési pontossága között csak a szikes talajcsoport két mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalom esetén volt szignifikáns különbség. Ezen talajoknál a -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség becslése szignifikánsan pontosabb volt a regressziós fánál (35. és 36. mellékletek). A megbízhatóság vizsgálata során nem volt szignifikáns különbség a két módszer között sem a víztartó képesség értékek, sem a hasznosítható vízkészlet becslésénél (38-42., 66-70., 86-90., 106-110. mellékletek). A talajcsoportonként kidolgozott becslő módszerek (CRT, CRT_kat, CHAID) megbízhatóságát jellemző RMSE értékeket az 4.6. ábra mutatja.



4.6. ábra. A talajcsoportonként kidolgozott regressziós (CRT_kat) és CHAID típusú fák becslési megbízhatóságát jellemző RMSE érték. A CRT3 regressziós fák folytonos talajtulajdonságok és a talaj altípusa alapján lettek kidolgozva, a CRT_kat és CHAID típusú fák pedig a kategória típusú talajtulajdonságok alapján. RMSE: átlagos négyzetes eltérés a becslt és mért értékek között.

Az 4.54. táblázat összefoglalja a kategóriák alapján becslő CHAID (CHAID2) és regressziós fa (CRT_kat), valamint a folytonos talajtulajdonságok és altípus alapján becslő regressziós fa (CRT3) becslési megbízhatóságát jellemző RMSE (négyzetes eltérés gyöke) és Pearson-féle koefficiens talajcsoportonként és becslt víztartó képesség értékenként.

A CHAID2 és CRT_kat modellek közül a kisebb hibát eredményező módszer RMSE értékét kiemeltem. A regressziós fával kidolgozott modell az esetek 56%-ában, a CHAID típusú becslések pedig az esetek 44%-ában adtak megbízhatóbb becslést. Az RMSE értéket tekintve, azonban átlagosan 0,09 tf%-kal volt jobb a regressziós fák becslési megbízhatósága.

4.54. táblázat. A talajcsoportonként kidolgozott regressziós és CHAID típusú fák becslési megbízhatósága. A CRT3 regressziós fák folytonos talajtulajdonságok és a talaj altípusa alapján lettek kidolgozva, a CRT_kat és CHAID típusú fák pedig a kategória típusú talajtulajdonságok alapján.

Becsült víztartó képesség	Módszer	Szikes talajok		Barna erdőtalajok		Csernozjom talajok		Réti talajok	
		RMSE	<i>P. k.k.</i> [†]	RMSE	<i>P. k.k.</i> [†]	RMSE	<i>P. k.k.</i> [†]	RMSE	<i>P. k.k.</i> [†]
$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	CRT3	4,767	0,522**	5,100	0,322**	4,014	0,418**	5,162	0,471**
	CRT_kat	4,488	0,588**	5,123	0,282*	3,948	0,448**	5,260	0,453**
	CHAID2	4,222	0,643**	5,202	0,250*	3,954	0,447**	5,254	0,453**
$\theta_{-33\text{kPa}}$	CRT3	5,264	0,731**	4,372	0,814**	3,466	0,566**	5,869	0,591**
	CRT_kat	4,935	0,772**	5,165	0,738**	3,269	0,619**	5,316	0,678**
	CHAID2	5,040	0,760**	5,171	0,706**	3,195	0,644**	5,542	0,640**
$\theta_{-1500\text{kPa}}$	CRT3	5,266	0,719**	4,560	0,663**	3,716	0,589**	4,257	0,752**
	CRT_kat	5,117	0,738**	4,484	0,655**	3,687	0,597**	4,805	0,671**
	CHAID2	5,163	0,740**	4,515	0,649**	3,540	0,623**	4,974	0,637**
$\theta_{-150000\text{kPa}}$	CRT3	1,509	0,671**	0,815	0,675**	0,759	0,755**	1,091	0,817**
	CRT_kat	1,249	0,787**	1,007	0,477**	0,863	0,666**	1,395	0,687**
	CHAID2	1,350	0,782**	0,977	0,535**	0,779	0,728**	1,319	0,721**

†: Pearson-féle korrelációs együttható.

CHAID2, CRT_kat: független változói kategória típusúak, melyek a térképi kódoknak felelnek meg, valamint a feltalaj és altalaj megkülönböztetése (kivéve a szikes talajoknál). A talajtérképi kódok jelentése talajtulajdonságokként az 1-8. mellékletekben látható.

CRT3: független változóként a CHAID és CRT_kat modellben használt input paramétereket tartalmazza, de azokat – a talaj altípus és az altalaj és feltalaj megkülönböztetése kivételével – folytonos értékeként, a fizikai féleség helyett az agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalmat (tömeg %), továbbá humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) tartalmat és pH_{H2O}-t, valamint szikes talajok esetén a vízzeloldhatóság-tartalmat (tömeg %).

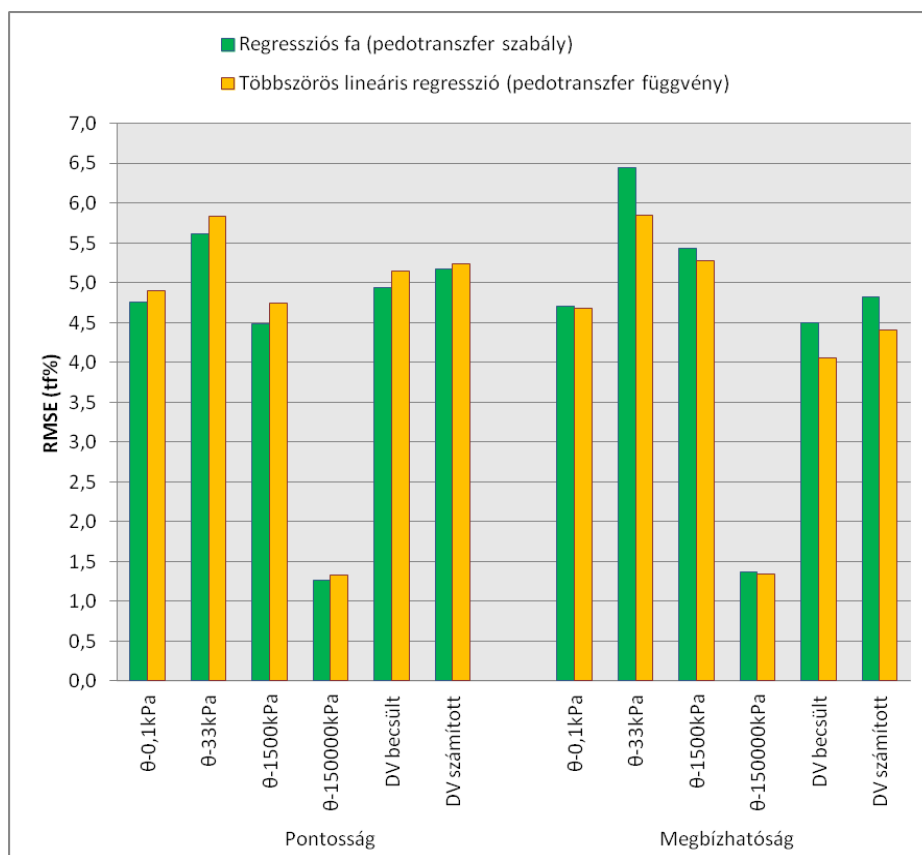
Továbbá a kategóriák alapján becslő módszerek megbízhatósága nem különbözik szignifikánsan a folytonos értékeket figyelembe vevő talajcsoportonként kidolgozott módszerekétől (38-42., 66-70., 86-90., 106-110. mellékletek). Lilly és munkatársai (2008) szintén azt tapasztalták, hogy olyan kategória változók alapján, melyeket a talajszelvény leírások során általában meghatároznak (altalaj és feltalaj elkülönítése, fizikai féleség, talajszerkezeti elem mérete) hasonló becslési eredmények érhetők el a talaj hidraulikus vezetőképességének becslésekor, mint folytonos értékek alapján (mechanikai összetétel, térfogattömeg, szerves anyag tartalom). Erre az adhat magyarázatot, hogy a klasszifikációs fa eljárás során a becslés intervallumokkal jellemezhető talajtulajdonság kombinációk eredménye, amelyben az egyes tulajdonságok pár %-os eltérése (ami a kategóriákon belül jellemző) nem befolyásolja a becslés megbízhatóságát.

A szikes, csernozjom és réti talajcsoportra kidolgozott CHAID modellek egyszerűbbek (4.5., 4.41. és 4.49. táblázatok), valamint pontosságuk és megbízhatóságuk két kivételtől eltekintve a regressziós fával kidolgozott módszerekéhez hasonló – a barna erdőtalajok esetén is. Tehát a nagyméretarányú (1:10.000) talajtérképek és kartogramok (kategória) információja alapján történő becslés előnyösebb a CHAID módszerrel, mint a regressziós fákkal. A modell lehetővé teszi a talajtulajdonságok és az adott víztartó képesség közötti összefüggések értelmezését.

4.7.2. Folytonos típusú input paraméterek

Ugyanazon folytonos input paraméterek (talajtulajdonságok) alapján kidolgozott regressziós fák és lineáris regressziók becslési pontosságát és megbízhatóságát a szikesek

talajcsoport vizsgálatánál hasonlítottam össze. A két módszer becslési pontossága és megbízhatósága nem különbözik egymástól szignifikánsan.



4.7. ábra. A regressziós fa és lineáris regresszió becslési pontossága és megbízhatósága a szikes talajok példáján. RMSE: átlagos négyzetes eltérés a mért és becsült értékek között.

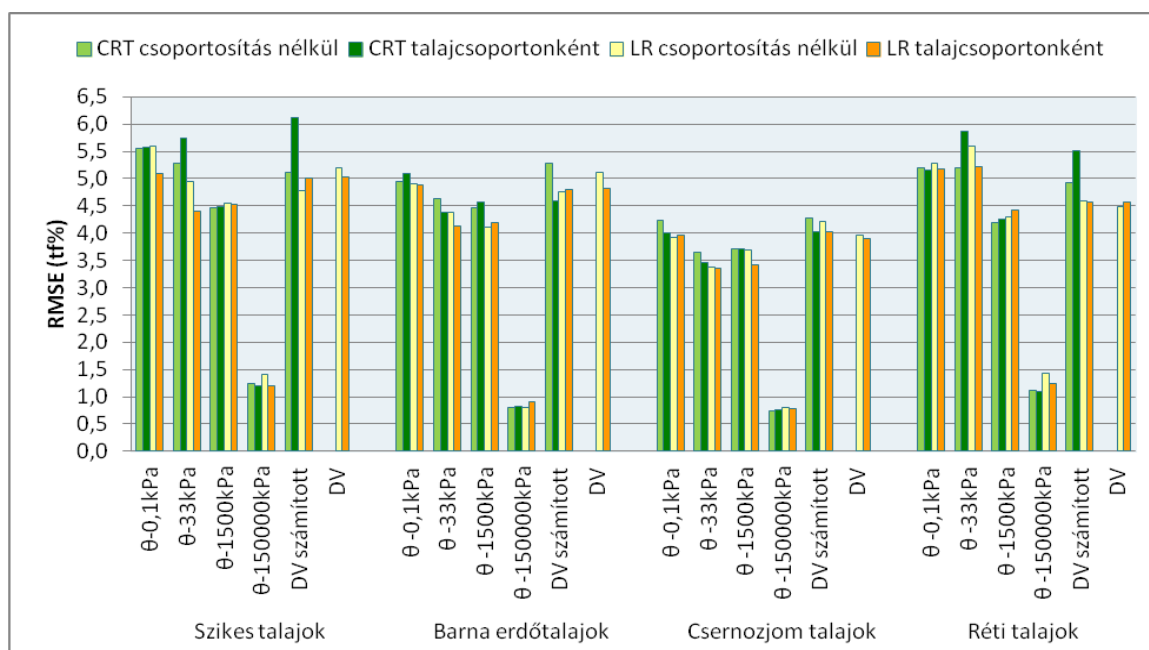
A regressziós fánál a pontosság jobb (4.7. ábra), mint a többszörös lineáris regressziónál (de a két módszer közötti különbség nem szignifikáns) és értelmezni lehet a talajtulajdonságok és a víztartó képesség kapcsolatát, ezért alkalmazása az összefüggés vizsgálatok szempontjából előnyösebb.

A becsült és mért érték közötti átlagos négyzetes eltérés gyökét (RMSE) tekintve a lineáris regresszióval kidolgozott becslés a vizsgált teszt adatbázison kisebb (4.7. ábra), de a két módszer közötti különbség nem szignifikáns. Abban az esetben tehát, ha csak folytonos talajtulajdonságok (például mechanikai összetétel, szervesanyag-, kalcium-karbonát tartalom, stb.) állnak rendelkezésre a becsléshez, adott mátrixpotenciál víztartó képesség becslése a többszörös lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvénnyel lehet eredményesebb.

4.7.3. Vegyes – folytonos és kategória – típusú input paraméterek

Vegyes típusú input paramétereket alkalmaztam a regressziós fák kidolgozásakor: a folytonos talajtulajdonságokat és a talaj altípusát, mely nominális változó. A talajcsoportonként lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvények is vegyes input paraméterű modellek, hiszen a talaj altípusának – ami nominális változó – ismeretét is felhasználtam a becslésekhez a talajcsoportok kialakításánál.

Az összes talajcsoport becslési megbízhatóságát (4.8. ábra) figyelembe véve, a talajcsoportonként kidolgozott lineáris regresszió a legmegbízhatóbb, igaz a különbségek nem szignifikánsak a regressziós fa és a lineáris regresszió között a talajcsoportokon belül.



4.8. ábra. Talajcsoportok kialakításával és a nélkül kidolgozott regressziós fák (CRT: folytonos változók és altípus alapján) és többszörös lineáris regresszió (LR) becslési megbízhatósága talajcsoportonként vizsgálva (a teszt adatbázison). RMSE: átlagos négyzetes eltérés a mért és becslt értékek között.

Tehát abban az esetben ha a víztartó képességet minél pontosabban és megbízhatóbban szeretnénk becsülni a talaj altípusa és folytonos talajtulajdonságok alapján, akkor az előzetesen kialakított talajcsoportokra lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvényeket javasolt alkalmazni. Ha a talajtulajdonságok és a víztartó képesség közötti fizikai összefüggések elemzése a cél, akkor viszont a talajcsoportonként kidolgozott regressziós fa használata az előnyösebb.

Abban az esetben, ha egyszerre több kategória típusú információ (például fizikai féleség, talajmorfológiai információk, talajképző kőzet, agyagásvány összetétel, stb.) és csak néhány folytonos talajtulajdonság áll rendelkezésre a becsléshez, a regressziós fa használata sokkal előnyösebb. A klasszifikáció során mind a függő, mind pedig a független változó lehet folytonos és kategória típusú is, így a becsléshez rendelkezésre álló összes információ könnyen figyelembe vehető a víztartó képesség számításához.

4.7.4. Az adatbázis előzetes csoportosítása

Lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvények

A csoportokra és a csoportosítás nélkül lineáris regresszióval kidolgozott pedotranszfer függvények becslési pontossága és megbízhatósága hasonló (4.8. ábra), nincs szignifikáns különbség a módszerek között (igaz, a csoportosított adatokon kapott eredmények minden

esetben jobb illeszkedést mutatnak, de a csoportosítás nem javította szignifikánsan a becslést).

Regressziós fa

A regressziós fa esetén a pontosság és a megbízhatóság (4.52. és 4.53. táblázatok) vizsgálata során hasonlóak az eredmények: az esetek 55 %-ában a csoportosítás nélküli regressziós fa a jobb, a fennmaradó 45 %-ban pedig a külön talajcsoportonként kidolgozott modellek.

A talajcsoportonként kidolgozott regressziós fa elemzése egyszerűbb, ezért a víztartó képesség és a könnyebben mérhető talajtulajdonásog közötti összefüggések vizsgálatára előnyösebb, ha a modelleket talajcsoportonként dolgozzuk ki.

A becslés megbízhatósága szempontjából viszont az egész adatbázisra kidolgozott regressziós fák becslése eredményesebb. Ez azzal magyarázható, hogy a regressziós fák becslési megbízhatóságát nagyban befolyásolja, hogy a modell kidolgozásához mekkora adatbázist használunk fel (a nagyobb mintaszám előnyösebb), valamint a talajtulajdonságok szempontjából abban mekkora a variabilitás. Éppen ezért a regressziós fák egyéb adatbázisra való alkalmazásánál még kritikusabb szempont, hogy csak abban esetben lehet eredményes a becslés, ha a vizsgálandó terület és a modell kidolgozásához használt becslő adatbázis talajait jellemző statisztikai mutatók hasonlóak (Schaap és Leij, 1998, Nemes et al., 2006, Tranter et al., 2009).

4.8. *Módszerajánlás*

Az elvégzett vizsgálatok eredményeinek ismeretében joggal merül fel a kérdés, hogy azok közül melyiket milyen célra lehet felhasználni. Itt érdemes megjegyezni, hogy doktori kutatásom célja a talajok víztartó képességének jellegzetességeinek feltárása, a vízgazdálkodásban szerepet kapó tényezők viszonyrendszerének feltérképezése volt. Ezért a kidolgozott modelleket is elsősorban azért közlöm disszertációm mellékletében teljes részletességükben, hogy erről a viszonyrendszerrel minél gazdagabb információ álljon rendelkezésre.

Az alkalmazott módszerek nagy száma és az összehasonlító vizsgálatok sokrétősége miatt azt gondolom, szükség lehet olyan támpontokra, amik segítenek eligazodni az egyes modellek alkalmazási lehetőségeiről. Ezért az alábbiakban összegezem a modellek nyújtotta lehetőségeket.

Gyakorlati szempontból két tényező van, ami a modell alkalmazhatóságát meghatározza: azok jósága (pontossága és megbízhatósága) és egyszerűsége. Tudományos, kutatási szempontból egy harmadik szempontot is figyelembe kell venni: a modellek értelmezhetőségét. Ez a harmadik szempont azért jelentős, mert csak olyan modellek alapján tudunk ajánlásokat megfogalmazni vagy további kutatási irányokat kijelölni, amik belső rendszerét átlátjuk, értjük.

Megítélésem szerint az általam kidolgozott módszerek között használati egyszerűségüket tekintve nincs számottevő különbség. Igaz ugyan, hogy talán a lineáris regresszió modellek alkalmazhatók legközvetlenebbül, ugyanakkor egyszerű számítógépes támogatással, bármelyik modell hasonló könnyedséggel alkalmazható. Ebből a szempontból tehát nem lehet előtérbe helyezni egyik modellt sem. A talajok teljes változatosságára kidolgozott modellek (LR: 111-114. mellékletek; CRT: 115-116. mellékletek) azonban abból a szempontból egyszerűbbek, hogy velük több modell is kiváltható, nagyobb talajváltozatosság víztartó képessége írható le, így nagyobb földrajzi területekre alkalmazhatók közvetlenül. A teljes adatbázison kidolgozott lineáris regressziós modellek amiatt is ajánlhatók, mert pontosságuk és megbízhatóságuk megegyezik az egyes főtípusok alapján kifejlesztett modellek pontosságával és megbízhatóságával (köztük statisztikailag szignifikáns különbség nincs). Amennyiben folytonos talajváltozók állnak rendelkezésünkre, gyakorlati alkalmazásra ezek a modellek ajánlhatók. A teljes adatbázison és a főtípusok adatain kidolgozott CRT modellek ezzel szemben pontosságukat tekintve már különbözőséget (statisztikailag szignifikáns különbséget) is mutatnak egymástól, azonos megbízhatóság mellett. A különbözőségek részben a talajonként csoportosított adatok előnyösségét mutatják, emiatt tehát itt nem javasolnám a teljes adatbázison kidolgozott modellek közvetlen gyakorlati alkalmazását. Kutatási, rendszerelemzési szempontból viszont – ha a talajtulajdonságok folytonos jellemzői állnak rendelkezésünkre – a CRT felhasználása előnyösebb az LR modelleknél, mert velük a fizikai összefüggések könnyebben értelmezhetők.

A CHAID modelleknek is a fizikai kapcsolatok értelmezhetősége az egyik legnagyobb előnye. Amennyiben kategória adatok állnak rendelkezésünkre, ezek becslésre hasonlóan jól használhatók, mint a kategória alapú CRT modellek, miközben értelmezésük azoknál könnyebb. Talajtérképi kategória adatok esetén tehát a dolgozatban bemutatott CHAID

módszer alapján képzett modellek (21-25, 47-50, 55-58, 75-78 és 95-98 sz. mellékletek) egyaránt javasolhatók gyakorlati és kutatási célokra.

5. Összefoglalás

A talajok víztartó képessége a talajfunkciók, köztük a mezőgazdasági termelésre való alkalmasság szempontjából nagyon fontos. A víztartóképeség mérése azonban meglehetősen időigényes és költséges, ezért mérés helyett gyakran becsüljük azt.

A földterületek víztartó képességének jellemzése - a talajfoltok mért, vagy becsült mutatóinak térbeli kiterjesztése - speciális térképekkel történhet. Közvetlen mérés alapján az említett okok miatt ritkán készülnek víztartó képesség térképek. A különböző léptékű általános talajtérképek is tartalmaznak azonban olyan adatokat, amik megfelelő alapot nyújthatnak a talaj vízgazdálkodási tulajdonságainak jellemzésére. A nagyméretarányú (1:100000 léptékű) talajtérképek hazánk talajtakarójának részletes térbeli jellemzésére szolgálnak és a legfontosabb általános fizikai, kémiai és genetikai talajjellemzőit tartalmazzák, kategória adatok formájában.

Kutatásaim során azt vizsgáltam, hogy kizárólag a részletes talajtérképeken feltüntetett talajjellemzők felhasználásával miként lehet becsülni a talajok víztartó képességét.

A vizsgálatokat a Magyarországi Részletes Talajfizikai Adatbázis (MARTHA) tette lehetővé. A MARTHA adatbázis kialakítására indított program (amiben a Pannon Egyetem, az MTA TAKI és az MGSZH vett részt) célja az összes Magyarországon elérhető, közvetlenül vizsgált talajfizikai és vízgazdálkodási adat összegyűjtése, összehangolása és egységes adatbázisba rendezése volt. Kutatásaimat tehát az tette lehetővé, hogy van egy olyan adatbázis, ami nagyszámú mért vízgazdálkodási adatot, valamint általános talajfizikai, kémiai és taxonómiai adatokat (vagyis olyan adatokat amik alapján a talajtérképek is készülnek) egyaránt tartalmaz, a hazai talajváltozatosságot jól reprezentálva.

Négy jellegzetes hazai főtípus – szikes talajok, barna erdőtalajok, csernozjom talajok és réti talajok – talaj altípusainak víztartó képességét vizsgáltam. A víztartó képesség és a nagyméretarányú talajtérképeken és kartogramokon feltüntetett talajtulajdonságok közötti összefüggések elemzését négy nevezetes mátrixpotenciálhoz (-0,1; -33, -1500 és -150000 kPa) tartozó víztartó képesség értékeken végeztem el.

A talajjellemzők és a víztartó képesség közötti kapcsolatok feltárására és számszerűsítésére a hazai és nemzetközi talajfizikai modellezési gyakorlatban használt eljárások (többszörös lineáris regresszió, klasszifikációs és regressziós fa) mellett, egy olyan új módszert is adaptáltam, amivel a talajjellemzők - térképeken feltüntetett - kategóriái alapján lehet becsülni víztartó képességüket.

Megállapítottam, hogy a nemzetközi talajtani kutatásban újdonságnak számító ún. CHAID (Chi-squared Automatic Interaction Detector) módszerrel kidolgozott pedotranszfer szabályok pontossága és megbízhatósága a négy mátrixpotenciál esetén hasonló a nemzetközi talajfizikai szakirodalomban elterjedt regressziós fával (CRT) kidolgozott modellekéhez. Ez alól csupán a szikes talajok alacsony mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képesség becslése kivétel.

A talajonként végzett részletes vizsgálatok alapján kidolgoztam a négy jellegzetes magyarországi talajfőtípushoz tartozó talajok víztartó képességét becslő modelleket. A kidolgozott becslő módszerek becslési pontosságát (0,8-5,6 tf%) és megbízhatóságát (0,8-

8,5 tf%) jellemző négyzetes eltérés gyökök értéke (RMSE) hasonló a szakirodalomban fellelhető módszerek RMSE értékeivel (4-5 tf% (Pachepsky és Rawls, 1999; Wösten et al., 2001; Nemes, 2003; Minasny et al., 2004; Lamorski et al., 2008; Twarakavi et al., 2009; Nemes et al., 2010). A kidolgozott módszereknél általánosságban elmondható, hogy a folytonos értékek ugyan kisebb RMSE értékeket eredményeznek, de a különbség csak néhány esetben szignifikáns. **A dolgozatban bemutatott CHAID módszer alkalmas a hazánkban előforduló jellegzetes talajok nevezetes mátrix pontenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékeinek becslésére – a nemzetközi szakirodalomban elfogadott hibaértékeken belüli pontossággal és megbízhatósággal – a nagymératarányú talajtérképek kategória információi alapján.**

Kimutattam az egyes talajcsoportokon belül a vízháztartásra ható tallajjellemzők egyedi kapcsolatrendszerét és ezeket az összefüggéseket számszerűsítettem is.

A kidolgozott modellek közvetlenül alkalmazhatók a mezőgazdasági és természetvédelmi tervezésben, a talajok és vízkészletek jobb hasznosítása érdekében.

6. Új tudományos eredmények

1. Faktoranalízis statisztikai módszerrel bizonyítottam, hogy a talaj főtípus más tulajdonságokkal kombináltan hozzájárul a talajok víztartó képességének leírásához.
2. CHAID (CHi-squared Automatic Interaction Detector) típusú döntési fa eljárás adaptálásával olyan becslő módszert dolgoztam ki, amellyel kategorizált talajinformációk alapján, számszerűen határozható meg az adott talaj víztartó képessége. Ezzel a nemzetközi talajfizikai szakirodalomban elterjedt klasszifikációs és regressziós fa (CRT) módszer olyan alternatíváját ismerttettem, ami a becslési pontosság és megbízhatóság szempontjából ahhoz hasonló, viszont áttekinthetőbb szerkezetű és talajtani szempontból könnyebben értelmezhető modelleket eredményez.
3. Részletes víztartó képesség becslő modellt dolgoztam ki Magyarország négy jellegzetes talajfőtípusának (szikes talajok, réti talajok, csernozjomok és barna erdőtalajok), illetve azok nagyméretarányú talajtérképeken feltüntetett talajaltípusai vízgazdálkodási tulajdonságainak leírására. A becslő modelleket a kutatásban és gyakorlatban négy gyakran használt nedvességpotenciál értékre (-0,1, -33, -1500 és -150000 kPa mátrixpotenciál) dolgoztam ki.
4. Jellegzetes hazai talajokon számszerűsítettem a talajaltípus víztartó képességre gyakorolt hatását és bizonyítottam, hogy a talaj altípusa a szikes talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának a meghatározásához nyújtja a legtöbb információt.
5. Számszerűsítettem a térfogattömeg nevezetesebb mátrixpotenciálokhoz tartozó víztartó képesség értékek becslésére gyakorolt hatását.

7. Irodalomjegyzék

- Acutis, M. & Donatelli, M., 2003. SOILPAR 2.00: Software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European J. Agron.* 18. (3–4) 373–377.
- Ahuja, L. R., Naney, J. W. & Williams, R. D., 1985. Estimating soil water characteristics from simpler properties or limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49. 1100–1105.
- Al Majou, H., Bruand, A., Duval, O., Le Bas, C. & Vautier, A., 2008. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. *Soil Use and Management.* 24. (4) 383–391.
- Arya, L. A. & Paris, J. F., 1981. A physico-empirical model to predict the moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45. 1023–1030.
- Bakacsi Zs., Farkas Cs., Pásztor L. & Szabó J., 2008. Talajhidrológiai paraméterek regionalizálása a Bodrogházban. In: *Talajtani Vádorgyűlés, Nyíregyháza, 2008. május 28–29.* 33-42. Talajvédelmi Alapítvány Bessenyi György Könyvkiadó.
- Baker, L., 2008. Development of class pedotransfer functions of soil water retention – A refinement. *Geoderma.* 144. 225–230.
- Baker, L. & Ellison, D., 2008. Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma.* 144. 212–224.
- Baranyai F. (szerk.), 1988. Útmutató a nagyméretarányú országos talajtérképezés végrehajtásához. *Agroinform. Budapest.* 147p.
- Baruth, B., Royer A., Klisch, A. & Genovese, G., 2008. The use of remote sensing within the MARS Crop Yield Monitoring System of the European Commission. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* 37. Part B8. 935–940.
- Bastet, G., 1999. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert: développement de nouvelles approches. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, France. cit: Pachepsky, Y. A. & Rawls, W. J. (Eds.), 2004. Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Chapter 10. Developments in Soil Science. Elsevier. Amsterdam.
- Batjes, N. H., 1996. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma.* 71. 31–52.
- Batjes, N. H., 2008. ISRIC-WISE Harmonized Global Soil Profile Dataset (Version 3.1). Report 2008/2. Wageningen: ISRIC – World Soil Information (with dataset). 52p.
- Batjes, N. H., Fischer, G., Nachtergaele, F. O., Stolbovoy, V. S. & van Velthuisen, H. T., 1997. Soil data derived from WISE for use in global and regional AEZ studies (ver.1.0). Interim Report IR-97-025. Laxenburg, FAO/IIASA/ISRIC: 27p.
- Batjes, N. H., Al-Adamat, R., Bhattacharyya, T., Bernoux, M., Cerri, C.E.P., Gicheru, P., Kamoni, P., Milne, E., Pal, D. K. & Rawajfih, Z., 2007. Preparation of consistent soil data sets for

-
- modelling purposes: Secondary SOTER data for four case study areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 122. 26–34.
- Bell, M. A. & van Keulen, J., 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. *Soil Sci Soc. Am. J.* 59. 865–871. cit: Minasny, B., 2007. Predicting soil properties. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*. 7. (1) 54–67.
- Blum, W.E.H. 2005. Functions of Soil for Society and the Environment. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 4. (3.) 75-79
- Bodon, F. 2010. Adatbányászati algoritmusok.
<http://www.cs.bme.hu/~bodon/magyar/adatbanyaszat/tanulmany/adatbanyaszat.pdf>
legutóbbi hozzáférés: 2011. június 18.
- Boettinger, J. L., D. W. Howell, A. C. Moore, A. E. Hartemink & S. Kienast-Brown. 2010. *Digital Soil Mapping: Bridging Research, Environmental Application, and Operation*. Springer. Dordrecht. 473p.
- Børgesen, C. D. & Schaap, M. G., 2005. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. *Geoderma*. 127. 154–167.
- Bouma, J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*. 9. 177–213.
- Bouma, J. & van Lanen, H. A. J., 1987. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. In: *Quantified Land Evaluation Procedures, Proc. Internat. Workshop on Quantified Land Evaluation Procedures, Washington, D. C., 27 April–2 May 1986*. 106-110. ITC. Publ. Enschede, The Netherlands.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A. & Stone, C. J., 1998. *Classification and regression trees*. (reprint) CRC Press. Florida. 358p.
- Briggs, L. J. & McLane, J. W., 1907. The moisture equivalent of soils. *USDA Bureau of Soils. Bulletin*. 45. 5–23.
- Bronick, C.J. & Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124. 3 –22.
- Brooks, R. H. & Corey, A. T., 1964. *Hydraulic Properties of Porous Media*. Hydrological Paper No. 27. Colorado State University. Fort Collins.
- Bruand, A. 1990. Improved prediction of water-retention properties of clayey soils by pedological stratification. *Journal of Soil Science* 41. 491-497.
- Bruand, A., Pérez Fernandez, P. & Duval, O., 2003. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management*. 19. (3) 232–242.
- Brutsaert, W., 1966. Probability laws for pore size distributions. *Soil Sci.* 117. 311–314.
- Buzás, I. (Ed.) 1993. *Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv. 1-2*. INDA Kiadó. Budapest.
- Cserhádi S. 1894. *Talajismeret*. Pátria Irodalmi Vállalat és Nyomdai Rt. Budapest.
- Cserhádi S. 1905 *Általános és különleges növénytermelés I. kötet. Általános növénytermelés*. Győr. 1107p.

- Comegna, V., Damiani, P. & Somella, A., 1998. Use of a fractal model for determining soil water retention curves. *Geoderma*. 85. 307–323.
- Cornelis, W. M., Ronsyn, J., Van Meirvenne, M. & Hartmann, R., 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65. 638–648.
- Cresswell, H. P., Pierret, C., Brebner, P. & Paydar, Z., 2000. The SH-Pro V1.03 Software for Predicting and Analysing Soil Hydraulic Properties. CSIRO Land and Water. Canberra, Australia.
- Daroussin, J. & King, D., 1996. Pedotransfer rules database to interpret the Soil Geographical Database of Europe for environmental purposes. In: *Proc. of the Workshop on the Use of Pedotransfer in Soil Hydrology Research in Europe*, Orleans, France, 10–12 October 1996. 25–40.
- Dobos, E., Carré, F., Hengl, T., Reuter, H.I. & Tóth, G., 2006. Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg. 68p.
- Entry, J.A., Mills, D., Mathee, K., Jayachandran, K., Sojka, R.E. & Narasimhan, G., 2008. Influence of irrigated agriculture on soil microbial diversity. *Applied Soil Ecology* 40 (1) 146–154.
- Farkas Cs., Hernádi H., Makó A. & Máté F., 2009. A talajvízmérleg klímaérzékenységének vizsgálata mészlepedékes csernozjom talajokon. *Agrokémia és Talajtan*. 58. 197–212.
- Fodor N. & Kovács G. J., 2001. A CERES modell továbbfejlesztése. II. A Richards-egyenlet paramétereinek meghatározása méréssel, ill. pedotranszfer függvények segítségével. *Agrokémia és Talajtan*. 50. 47–61.
- Fodor N., Kovács G. J. & Karuczka A., 2001. A CERES modell továbbfejlesztése. I. A Richards-egyenlet beépítése után, összehasonlítás az eredeti változattal. *Agrokémia és Talajtan*. 50. 35–47.
- Fodor N. & Rajkai K., 2004. Talajfizikai tulajdonságok becslése és alkalmazásuk modellekben. *Agrokémia és Talajtan*. 53. 225–238.
- Fodor N. & Rajkai K., 2005. Számítógépes program a talajok fizikai és vízgazdálkodási jellemzőinek egyéb talajjellemzőkből történő számítására (TALAJTANonc 1.0). *Agrokémia és Talajtan*. 54. 25–40.
- Giménez, D., Rawls, W.J., Pachepsky, Y. & Watt, J.P.C. 2001. Prediction of a pore distribution factor from soil textural and mechanical parameters. *Soil Sci.* 166. 79–88.
- Grábner E. 1942. Szántóföldi növénytermesztés. Második, átdolgozott és bővített kiadás. Pátria Irodalmi Vállalat és Nyomda Rt. Budapest. 1050p.
- Guber, A., Pachepsky, Y.A., Shein, E. & Rawls, W.J., 2004. Soil aggregates and water retention. In: Pachepsky, Y. A. and Rawls, W. J. (Eds.), 2004. *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*. Developments in Soil Science. Elsevier. Amsterdam. 512p.
- Gupta, S. C. & Larson, W. E., 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research*. 15. 1633–1635.

-
- Hall, D. G., Reeve, M. J., Thomasson, A. J. & Wright, V. F., 1977. Water Retention, Porosity and Density of Field Soils. Technical Monograph. No. 9. Soil Survey of England and Wales. Harpenden.
- Haverkamp, R. & Parlange, J. Y., 1986. Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soil without organic matter. *Soil Sci.* 142. 325–339.
- Haverkamp, R., Zammit, C., Bouraoui, F., Rajkai, K., Arrúe, J. L. & Heckmann, N., 1998. GRIZZLY, Grenoble Catalogue of Soils: Survey of soil field data and description of particle-size, soil water retention and hydraulic conductivity functions. Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE). France: Grenoble Cedex 9. cit: Nemes, A. 2011. Databases of soil physical and hydraulic properties. *Encyclopedia of Agrophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer. 194-199.
- Hámori, G. 2001. A CHAID alapú döntési fák jellemzői. *Statisztikai Szemle*, 79. 8. 703-710.
- Hill, T. & Lewicki, P., 2006. *Statistics: methods and applications. A comprehensive reference for science, industry and data mining*. Statsoft. Tulsa, OK. 832p.
- Hodnett, M.G. & Tomasella, J., 2002. Marked differences between van Genuchten soil water retention parameters for temperate and tropical soils: a new pedotransfer functions developed for tropical soils. *Geoderma* 108, 155-180.
- Iden, S. C. & Durner, W., 2008. Free-form estimation of soil hydraulic properties using Wind's method. *European J. Soil Sci.* 59. 1228–1240.
- Jamagne, M., Bétrémieux, R., Bégon, J. C. & Mori, A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull. Information Tech.* 324–325, 627–641. cit: Pachepsky, Y. A. & Rawls, W. J. (Eds.), 2004. *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Chapter 10. Developments in Soil Science*. Elsevier. Amsterdam.
- Jones, R.J.A., Houšková, B., Bullock P. & Montanarella, L. (eds.), 2005. *Soil Resources of Europe. Second edition. European Soil Bureau Research Report No.9. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.* 420p.
- Kemenesy E., 1964. *Talajművelés, Mezőgazdasági*, Budapest, Hungary.
- Khodaverdiloo, H. & M. Homaei., 2004. Pedotransfer Functions of some Calcareous Soils. In: Wöhrle, N. and Scheurer, M.: *EUROSOIL 2004. Abstracts and Full Papers. September, 4–12 Freiburg, Germany.* 10. 27.1-11.
- Kotzmann L., 1938. A higroszkópos nedvesség, mint a talaj kötöttségének jellemzője. *Mezőgazd. Kutatások.* 11. 217. cit: Mados (Kotzmann) L., 1939. Öntözési és vízgazdálkodási tanulmányok a tiszafüredi öntözőrendszer területén. *Öntözésügyi Közlemények.* 1. (1) 89–116.
- Kreybig L., 1951. *A talajok hő- és vízgazdálkodása. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest.*
- Lamorski, K., Pachepsky, Y.A., Slawinski, C. & Walczak, R., 2008. Using support vector machines to develop pedotransfer functions for water retention of soils in Poland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72. 1243-1247.

- Lamp, J. & Kneib, W., 1981. Zur quantitativen Erfassung und Bewertung von Pedofunktionen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. 32. 695–711.
- Láng I., Jolánkai M. & Kömíves T. 2004. Pollution processes in agri-environment. A new approach. Akaprint Publishers. Budapest. 277p.
- Li, Y. et al., 2007. Estimating soil hydraulic properties of Fengqiu County soils in the North China Plain using pedo-transfer functions. *Geoderma*. 138. 261–271.
- Lilly, A., Boorman, D. B. & Hollis, J. M., 1996 The use of pedotransfer in the development of a hydrological classification of UK soils (HOST). Proc. of the Workshop on the Use of Pedotransfer in Soil Hydrology Research in Europe, Orleans, France, 10–12 October 1996. 55–57.
- Lilly, A., Nemes, A., Rawls, W.J. & Pachepsky, Y. A., 2008. Probabilistic approach to the identification of input variables to estimate hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 72 (1). 16-24.
- Lin, H. S., McInnes, K. J., Wilding, L. P., & Hallmark, C. T., 1999. Effects of soil morphology on hydraulic properties: II. Hydraulic pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63. 955–961.
- Mados (Kotzmann) L., 1939. Öntözési és vízgazdálkodási tanulmányok a tiszafüredi öntözőrendszer területén. *Öntözésügyi Közlemények*. 1. (1) 89–116.
- Mados L., 1942. Általános talajtani ismeretek. Kézirat. Diószegi Lehel Leíró- és Sokszorosító Irodája. Budapest.
- Makó, A., 2002. Measuring and estimating the pressure-saturation curves on undisturbed soil samples using water and NAPL. *Agrokémia és Talajtan*. 51. 27–36.
- Makó, A. & Elek, B. 2005. Measuring and estimating the capillary pressure – saturation curves of soils saturated with oil/air and water/air phases. 13th International Poster Day Transport of Water, Chemicals and Energy in the System Soil-Crop Canopy-Atmosphere. Bratislava, 10.11.2005. 343-346.
- Makó A. & Tóth B., 2007. A talajok vízgazdálkodása és a talajtermékenység. *Agronapló*. XI. 2007/02.
- Makó A., Tóth B. & Rajkai K., 2007. A talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak földminősítési célú becslése. In: *Földminősítés a XXI. században! Földminőség, földértékelés és földhasználati információ a környezetbarát gazdálkodás versenyképességének javításáért*. Keszthely, 2007. november 22–23. 45-50. MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet. Budapest.
- Makó, A., Rajkai, K., Tóth, G. & Hermann, T., 2005. Estimating soil water retention characteristics from the soil taxonomic classification and mapping informations: consideration of humus categories. *Cereal Research Communications* 34. 199–201.
- Makó, A., Tóth, B., Hernádi, H., Farkas, Cs. & Marth, P., 2010. Introduction of the Hungarian Detailed Soil Hydrophysical Database (MARTHA) and its use to test external pedotransfer functions. *Agrokémia és Talajtan*. 59. 29–38.

-
- Makó, A., Tóth, B., Hernádi, H., Farkas, Cs. & Marth, P., 2011. A MARTHA adatbázis alkalmazása a hazai talajok víztartó képesség becslésének pontosítására. Talajvédelem különszám. Farsang Andrea, Ladányi Zsuzsanna (szerk.): Talajaink a változó természeti és társadalmi hatások között Talajtani vándorgyűlés Szeged, 2010. szeptember 3-4. Manninger G. A., 2002. A talaj sekély művelése. Harmadik kiadás. Bóly Rt. Bóly. 124p.
- Mayr, T. & Jarvis, N. J., 1999. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks–Corey type model. *Geoderma*. 91. 1–9.
- McBratney, A. B., Minasny B., Cattle S.R. & Vervoort R.W. 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma* 109. 41–73.
- McKenzie, N. & Jacquier, D., 1997. Improving the field estimation of saturated hydraulic conductivity in soil survey. *Australian Journal of Soil Research* 35. 803–827.
- McKenzie, N. J. & MacLeod, D. A., 1989. Relationships between soil morphology and soil properties relevant to irrigated and dryland agriculture. *Aust. J. Soil Res.* 35. 803–825.
- MÉM 1986. 20/1986. (XII. 28.) MÉM rendelet a földértékelésről szóló 1980. évi 16. törvényerejű rendelet végrehajtásáról. (Mezőgazdasági és Élelmezésügyi Minisztérium) Magyar Közlöny 1986/54 (XII. 28.)
- Minasny, B., 2007. Predicting soil properties. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*. 7. (1.) 54–67.
- Minasny, B., McBratney, A. B. & Bristow, K. L., 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*. 93. 225–253.
- Minasny, B., J., Hopmans, J. W., Harter, T., Eching, S. O., Tuli, A. & Denton, M. A., 2004. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68. 417–429.
- Nagyváthy J., 1821. Magyar practicus termesztő. Trattner. Pest
- Nemes, A., 2002. Unsaturated Soil Hydraulic Database of Hungary: HUNSODA. *Agrokémia és Talajtan*. 51. 17–26.
- Nemes, A., 2003. Multi-scale pedotransfer functions for Hungarian soils. Doctoral thesis. Wageningen. 115p.
- Nemes, A., 2011. Databases of soil physical and hydraulic properties. *Encyclopedia of Agrophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer. 194–199.
- Nemes, A., Pachepsky, Y.A. & Timlin, D., 2010. Toward improving estimates of field capacity from laboratory measured soil properties. *Proceedings of World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*. 1–6 August 2010, Brisbane, Australia. 182–185.
- Nemes, A., Rawls, W.J. & Pachepsky, Ya.A., 2006. Use of a non-parametric nearest-neighbor technique to estimate soil water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(2). 327–336.
- Nemes, A., Roberts, R. T., Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A. & Van Genuchten, M. T., 2008. Software to estimate -33 and -1500 kPa soil water retention using the non-parametric k-nearest neighbor technique. *Environmental Modelling & Software*. 23. (2) 254–255.

- Nemes, A., Schaap, M. G., Leij, F. J. & Wösten, J. H. M., 2001. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *J. Hydrol.* 251. 151–162.
- Nemes, A., Schaap, M. G. & Wösten, J. H. M., 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Sci. Soc. Am J.* 67. 1093–1102.
- Nemes, A., Wösten, J. H. M., Lilly, A. & Oude Vorshaar, J. H., 1999. Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma.* 90. 187–202.
- Pachepsky, Y.A. & Schaap, G., 2004. Data mining and exploration techniques. In: Pachepsky, Y. A. and Rawls, W. J. (Eds.), 2004. *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Developments in Soil Science.* Elsevier. Amsterdam. 512p.
- Pachepsky, Y.A., and Rawls, W.J., 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal.* 63, 1748-1757.
- Pachepsky, Y. A. & Rawls, W. J., 2003. Soil structure and pedotransfer functions. *European J. Soil Sci.* 54. 443–451.
- Pachepsky, Y. A. & Rawls, W. J. (Eds.), 2004. *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Developments in Soil Science.* Elsevier. Amsterdam.
- Pachepsky, Y. A., Rawls, W. J. & Lin, H. S., 2006. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma.* 131. 308–316.
- Pachepsky, Y. A., Timlin, D. J. & Rawls, W. J., 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65. 1787–1795.
- Pachepsky, Y. A., Timlin, D. & Várallyay, Gy., 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60. 727–733.
- Pachepsky, Y.A., Shcherbakov, R.A., Várallyay, Gy. & Rajkai, K., 1982. Soil water retention as related to other soil physical properties. *Pochvovedenie.* 2. 42–52.
- Quisenberry, V. L., Smith, B. R., Phillips, R. E., Scott, H. D. & Nortcliff, S., 1993. A soil classification system for describing water and chemical transport. *Soil Sci.* 156. 306–315.
- Rab, M.A., Chandra, S., Fisher, P.D., Robinson, N.J., Kitching, M., Aumann, C.D. & Imhof, M., 2011. Modelling and prediction of soil water contents at field capacity and permanent wilting point of dryland cropping soils. *The Free Library.* (2011, August 1). Utolsó hozzáférés: 2011. október 9. [http://www.thefreelibrary.com/Modelling and prediction of soil water contents at field capacity and...-a0264365345](http://www.thefreelibrary.com/Modelling+and+prediction+of+soil+water+contents+at+field+capacity+and+...-a0264365345)
- Rajkai K., 1988. A talaj víztartó képessége és különböző talajtulajdonságok összefüggésének vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan.* 36–37. 15–30.
- Rajkai K., 2004. A víz mennyisége, eloszlása és áramlása a talajban. MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet. Budapest.
- Rajkai K. & Kabos S., 1999. A talaj víztartó képesség-függvény (pF-görbe) talajtulajdonságok alapján történő becslésének továbbfejlesztése. *Agrokémia és Talajtan.* 48. 15–32.

-
- Rajkai, K., Kabos, S. & van Genuchten, M. T., 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: Comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil and Tillage Research*. 79. (2 Spec. issue) 145–152.
- Rajkai, K. & Várallyay, Gy., 1992. Estimating soil water retention from simpler properties by regression techniques. In: *Proc. Internat. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. 417-426. University of California, Riverside, CA.
- Rajkai K., Várallyay Gy., Pacsepszik, J. A. & Cserbakov, R. A., 1981. pF-görbék számítása a talaj mechanikai összetétele és térfogattömege alapján. *Agrokémia és Talajtan*. 30. 409–438.
- Rawls, W. J., 1983 Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Sci*. 135. 123–125.
- Rawls, W. J. & Brakensiek, D. L., 1982. Estimating soil water retention from soil properties J. *Irrig. Drainage Div. ASCE*. 108. 166–171.
- Rawls, W. J. & Brakensiek, D. L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: *Watershed Management in the 1980s. Proc. Symposium of Irrig. Drainage Div., Denver, CO., April 30–May 1, 1985*. 293-299. Am. Soc. Civil Eng., New York.
- Rawls, W. J., Brakensiek, C. L. & Saxton, K. E., 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions American Society of Agricultural Engineers*. 25. 1316–1320.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. & Soni, B., 1983. Agricultural management effects on soil water processes. Part I. Soil water retention and Green-Ampt parameters. *Transactions American Society of Agricultural Engineers*. 26. 1747–1752.
- Rawls, W. J., Nemes, A. & Pachepsky, Y. A., 2004. Effect of soil organic carbon on soil hydraulic properties. In: Pachepsky, Y. A. and Rawls, W. J. (Eds.), 2004. *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Developments in Soil Science*. Elsevier. Amsterdam. 512p.
- Rawls, W.J. & Pachepsky, Y.A., 2002. Soil consistence and structure as predictors of water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66. 1115-1126.
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A. & Shen, M. H., 2001. Testing soil water retention estimation with the MUUF pedotransfer model using data from the southern United States. *Journal of Hydrology*. 251. 177–185.
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M. & Bloodworth, H., 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*. 116. 61–76.
- Romano, N. & Palladino, M., 2002. Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes. *Journal of Hydrology*. 265. 56–75.
- Rossiter, D. G., 2003. Biophysical models in land evaluation. In: *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, developed under the auspices of the UNESCO. (Ed.: Verheye, W. H.) Article 1.5.27. in Theme 1.5 Land Use and Land Cover. 1-16. EOLSS Publishers. Oxford.
- Russo, D., 1988. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation, on the selection of a model for the hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 24: 453-459. In: Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A. & Rawls, W. J., 2001. "Pedotransfer functions: bridging

- the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics." *Journal of Hydrology* 251(3-4). 123-150.
- Salter, P. J. & Williams, J. B., 1965. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. I. A critical comparison for determining the available water capacity and moisture characteristics curve of a soil. *J. Soil Sci.* 16. 1–15.
- Salter, P. J. & Williams, J. B., 1967. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV. A method of estimating the available-water capacities of profiles in the field. *J. Soil Sci.* 18. 174–181.
- Santra, P. & Das, B. S., 2008. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. *Geoderma*. 146. 439–448.
- Sárközy F., 1998. Mesterséges neurális hálózatok mint GIS függvények. In: *Geomatika a geodézia elméletében és gyakorlatában*, Sopron, 1998. október 29–30. *Geomatikai Közlemények*. I. 109-129.
- Schaap, M. G. & Leij, F. J., 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sci.* 163. 765–779.
- Schaap, M. G., Leij, F. J. & van Genuchten, M. T., 1999. A bootstrap-neural network approach to predict soil hydraulic parameters. In: *Proc. Internat. Workshop Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. 1237–1250.
- Schaap, M. G., Leij, F. J. & Van Genuchten, M. T., 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 251. 163–176.
- Scheinost, A. C., Sinowski, W. & Auerswald, K., 1997. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape. I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*. 78. 129–143.
- Sharma, S. K., Mohanty, B. P. & Zhu, J., 2006. Including topography and vegetation attributes for developing pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70. 1430–1440.
- Soil Survey Staff, 1997. Soil characterization data. Lincoln, NE: [CD-ROM] Soil Survey Laboratory, National Soil Survey. cit: Nemes, A. 2011. Databases of soil physical and hydraulic properties. *Encyclopedia of Agrophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer. 194-199.
- SPSS, 2004. Classification Trees 13.0. SPSS Inc., USA. 127p.
- Stefanovits P., Filep Gy. & Fülek Gy., 1999. *Talajtan*. Mezőgazda Kiadó Budapest.
- Szabolcs I. 1966. A genetikus üzemi talajtérképezés módszerkönyve. Országos Mezőgazdasági Minőségvizsgáló Intézet. Budapest
- Tempel, P., Batjes, N. H. & van Engelen, V. W. P., 1996. IGBP-DIS soil data set for pedotransfer function development. Working paper and Preprint 96/05, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). Wageningen.
- Tietje, O. & Tapkenhinrichs, M., 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 57. 1088–1095.

-
- Tomasella, J., Hodnett, M. G. & Rossato, L., 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64. 327–338.
- Tomasella, J., Pachepsky, Y., Crestana, S. & Rawls, W.J. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67. 1085–1092.
- Tóth B., Makó A., Rajkai K. & Marth P., 2005., 2005. A talajok víztartó képességének becslési lehetőségei genetikus üzemi talajtérképek és kartogramok alapján. III. Erdei Ferenc Konferencia, Kecskemét 2005. augusztus 23–24. 850-854.
- Tóth, B., Makó, A., Rajkai, K., Kele, Sz. G., Hermann, T. & Marth, P., 2006. Use of soil water retention capacity and hydraulic conductivity estimation in the preparation of soil water management maps. *Agrokémia és Talajtan.* 55. 49–58.
- Tóth, G. & Máté, F., 2006. Megjegyzések egy országos, átnézetes, térbeli talajinformációs rendszer kiépítéséhez. *Agrokémia és Talajtan.* 55(2). 473-478.
- Tranter, G, McBratney, A. B. & Minasny, B., 2009. Using distance metrics to determine the appropriate domain of pedotransfer function predictions. *Geoderma.* 149. 421–425.
- Twarakavi, N. K. C., Šimůnek, J. & Schaap, M., 2009. Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73(5). 1443-1452.
- Tyler, S. W. & Wheatcraft, S. W., 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53. 987–996.
- Uno, Y., Prasher, S.O., Patel, R.M., Strachan, I.B., Pattey, E. & Karimi, Y., 2005 Development of field-scale soil organic matter content estimation models in Eastern Canada using airborne hyperspectral imagery. *Canadian Biosystems Engineering.* 47. 1.9–1.14.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1951. Soil Survey Manual. U.S. Dept. Agriculture Handbook No 18. Washington. D.C., USA. cit.: Nemes, A., 2003. Multi-scale pedotransfer functions for Hungarian soils. Doctoral thesis. Wageningen. 115p.
- van Genuchten, M. Th., 1980. Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44. 892–898.
- Várallyay Gy., 1997. A talaj és funkciói. *Magyar Tudomány.* XLII. (12). 1414-1430.
- Várallyay Gy., 2002a. A talaj multifunkcionalitásának szerepe a jövő fenntartható mezőgazdaságában. In: A növénytermelés szerepe a jövő multifunkcionális mezőgazdaságában. Ötven éves az Acta Agronomica Hungarica. Jubileumi tudományos ülés (2002. XI. 19. Martonvásár) kiadványa. *Acta Agronomica Hungarica. Supplementum.* 13-25.
- Várallyay Gy., 2002b. A mezőgazdasági vízgazdálkodás talajtani alapjai. Budapest.
- Várallyay Gy., 2004. A talaj vízgazdálkodásának agroökológiai vonatkozásai. *AGRO-21 Füzetek.* 37. 50–70.
- Várallyay Gy., 2005a. Magyarország talajainak vízraktározó képessége. *Agrokémia és Talajtan.* 54. 5–24.
- Várallyay Gy., 2005b. Soil water management and the environment. In: *Environmental Science and Technology in Hungary.* Műszaki Kiadó. Budapest. CD ROM.

- Várallyay Gy., Rajkai K., Pacsepszik, J. A. & Mironenko, E. V., 1979. A pF-görbék matematikai leírása. *Agrokémia és Talajtan*. 28. 15–38.
- Várallyay Gy., Szűcs L., Rajkai K., Zilahy P. & Murányi A. 1980. Magyarországi talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak kategóriarendszere és 1:100 000 méretarányú térképe. *Agrokémia és Talajtan*. 29. 77–112.
- id. Várallyay Gy., 1942 Öntözési tapasztalatok Márialigeten. *Öntözésügyi Közlemények*. 4. (2) 323–325.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. & Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science* 148. 389–403.
- Walczak, R. T., Moreno, F., Sławiński, C., Fernandez, E. & Arrue, J. L., 2006. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *Journal of Hydrology*. 329. 527–533.
- Wösten, J. H. M., Finke, P. A. & Jansen, M. J. W., 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*. 66. 227–237.
- Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A. & Rawls, W. J., 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*. 251. 123–150.
- Wösten, J. H. M., Schuren, C. H. J. E. Bouma, J., & Stein, A., 1990. Functional sensitivity analysis of four methods to generate soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54. 832–836.
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A. & Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*. 90. 169–185.

Egyéb források

<http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/spssstat/v20r0m0/index.jsp>

<http://www.tankonyvtar.hu/statisztika/biostatisztika-080904-71>

8. Köszönetnyilvánítás

Doktori kutatásom során sokan segítettek a munkámat. Köszönettel tartozom a szakmai támogatásért mindenekelőtt Makó Andrásnak, a témavezetőmnek, aki egy nagyon érdekes kutatási téma vizsgálatát tette lehetővé. Köszönöm szépen, hogy nem ellenezte a doktori tanulmányok idejét nagy részben jellemző „táv kutatásomat”. Külön szeretném megköszönni az irántam tanúsított sok türelmét és bizalmát.

Szeretném megköszönni Alberto Guadagnininek, Laura Guadagnininek, Arianna Azzellinonak és Alessandro Rossinak a statisztikai vizsgálatok terén nyújtott szakmai segítségüket.

Köszönöm szépen a szakmai tanácsokat Nemes Attilának, Rajkai Kálmánnak, Melanie Weynantsnak, Várallyay Györgynek és Henk Wöstennek.

A talajtani kutatásokat Tudományos Diákköri hallgatóként Tóth Tibor, Csató Szilvia és Tamás Zsuzsanna segítségével kezdtem. Zsuzsika néni nagymama korát meghazudtolva repült a laborban fel-le, és vigyázott rám a mindenféle előképzettség nélkül laborba beszábadult kénsavat lötybölő hallgatóra.

Köszönettel tartozom Debreczeni Bélánének, Elek Barbarának, Farkas Csillának, Hermann Tamásnak, Hernádi Hildának, Marth Péternek, Molnár Hajnalkának és Szabóné Kele Gabriellának, a doktori témámban írt közös publikációkban nyújtott segítségükért.

Doktori kutatásom legfontosabb feltételét: a Magyarországi Részletes Talajfizikai és Hidrológiai Adatbázis (MARTHA) létrejöttét az OTKA T048302 számú téma biztosította. Köszönöm szépen, hogy használhattam az adatbázist, amit a megyei Növény- és Talajvédelmi Szolgálat (új nevén: Mezőgazdasági Szakigazgatási Hivatal), az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézet és a Pannon Egyetem Gerorgikon Kar Növénytermesztés- és Talajtani Tanszék hozott létre. Szeretnék külön köszönetet mondani Farkas Csillának, Kocsis Mihálynak és Hernádi Hildának az adatbázis gyűjtésében, rendszerezésében és szűrésében végzett munkájukért. Doktori kutatásaimat segítette továbbá a MyWater kutatási projekt (FP7/2007-2013). A Milánói Műszaki Egyetem Környezeti Hidrológia Tanszékén töltött fél éves ösztöndíjamat az Olasz Külügyminisztérium finanszírozta.

Köszönettel tartozom szüleimnek, akik biztosították a háttérrel a tanulmányaimhoz.

Természetesen férjemnek, Gergőnek van a legnagyobb szerepe abban, hogy a dolgozatomat befejeztem. A köszönet kérés mellett Tőle főként bocsánatot is kell kérnem, hogy az utolsó pár hónapban olyan kibírhatatlan voltam. Julcsinak és Bandinak is köszönöm szépen, hogy ilyen jól átvészelték anya „doktori írók időszakát”, amit persze Gergőnek, Szutyi Mamának, a szüleimnek és a bölcsi dadusainak (Daniela, Greta, Silvia, Dani, Monica, Pamela) is nagyban köszönhetek.

Ispra, 2011. október 15.

Mellékletek

1. melléklet. A talajtérképek fizikai féleséget jellemző kódjai.

Kód	Fizikai féleség
1	durva homok
2	homok
3	homokos vályog
4	vályog
5	agyagos vályog
6	agyag
7	nehéz agyag
8	<i>kotu, tőzeg, nagy szervesanyagtartalmú lápos képződmények*</i>
9	<i>durva vázrészek (kő, kavics sóder)*</i>

*A 8-as és 9-es kóddal jelölt talajtulajdonságok víztartó képességre gyakorolt hatását nem vizsgáltuk, mert a MARTHA adatbázis nem rendelkezik ilyen típusú talajinformációval.

2. melléklet. A kémhatás és mészállapot kartogramon szereplő vizes pH kódok jelentése.

Kód	pH _{H2O}
1	< 4,5
2	4,5 – 5,5
3	5,51 – 6,8
4	6,81 – 7,2
5	7,21 – 8,5
6	8,51 – 9,0
7	> 9,0

3. melléklet. A kémhatás és mészállapot kartogramon szereplő kalcium-karbonát tartalmat jellemző kódok jelentése.

Kód	Kalcium-karbonát tartalom (tömeg %)
1	0
2	0,1 – 5,0
3	5,1 – 10,0
4	10,1 – 25,0
5	> 25,0

4. melléklet. A szikesedési tulajdonságok kartogram vízdoldhatósó-tartalmat jellemző kódjainak jelentése.

Kód	Vízben oldható só-tartalom (tömeg %)
1	0 – 0,15
2	0,16 – 0,25
3	0,26 – 0,40
4	> 0,40

5. melléklet. A szikes talajokra átalakított térképi humusz kódok jelentése.

Átalakított humusz kód	Szerves anyag tartalom (tömeg %)
1	< 1,0
2	1,0 – 1,2
3	1,2 – 1,5
4	1,5 – 2,0
5	2,0 – 3,0
6	3,0 – 3,5
7	3,5 – 4,0
8	4,0 – 5,0
9	5,0 – 6,0
10	6,0 – 7,0
11	7,0 – 10,0
12	10,0 – 20,0
13	20,0 – 25,0
14	25,0 <

6. melléklet. A barna erdőtalajokra átalakított térképi humusz kódok jelentése.

Átalakított humusz kód	Szerves anyag tartalom (tömeg %)
1	< 1,0
2	1,0 – 1,5
3	1,5 – 2,0
4	2,0 – 3,0
5	3,0 <

7. melléklet. A nem szikes csernozjom talajokra átalakított térképi humusz kódok jelentése.

Átalakított humusz kód	Szerves anyag tartalom (tömeg %)
1	< 1,5
2	1,5 – 2,0
3	2,0 – 3,5
4	3,5 <

8. melléklet. A nem szikes réti talajokra átalakított térképi humusz kódok jelentése.

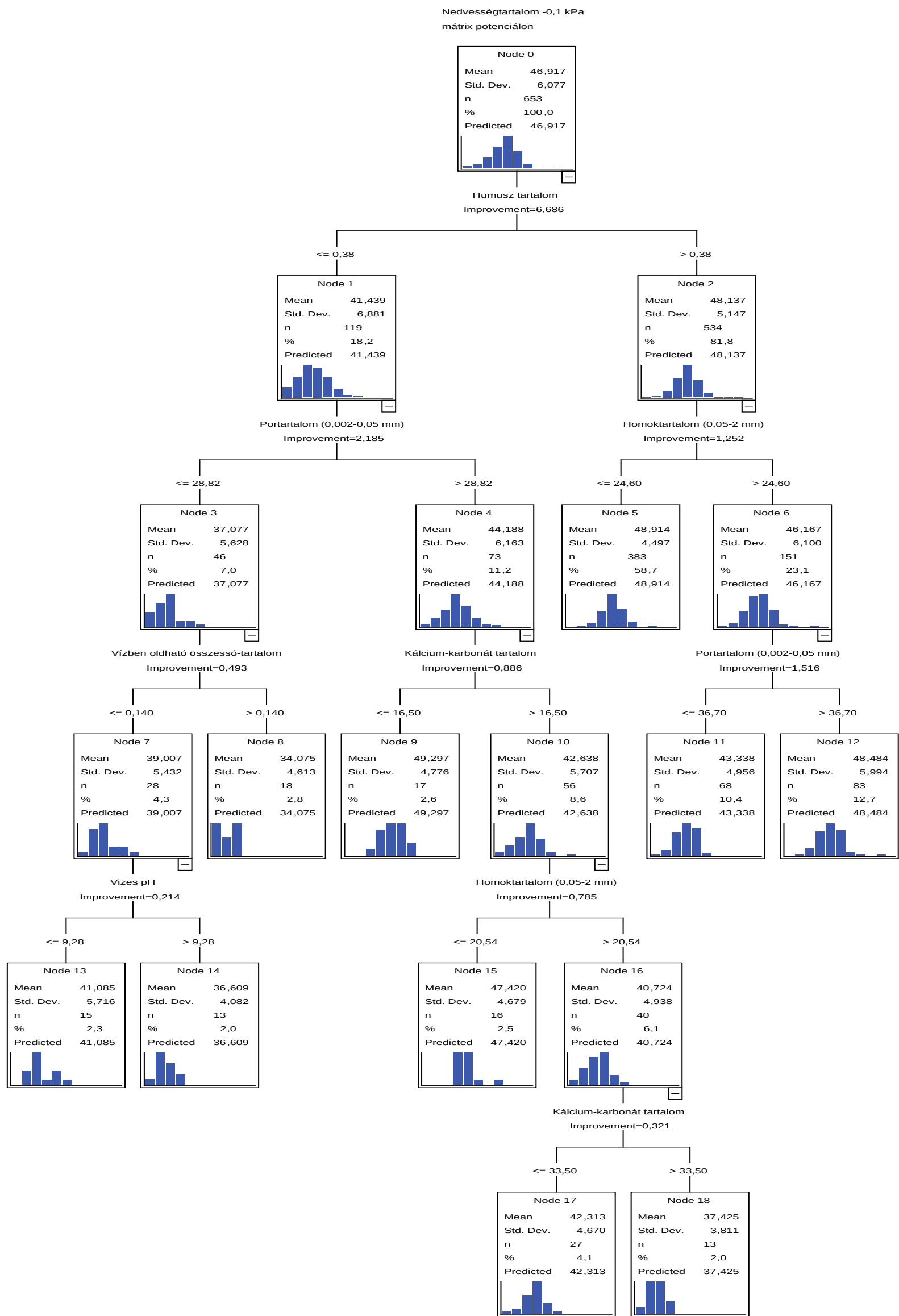
Átalakított humusz kód	Szerves anyag tartalom (tömeg %)
1	< 1,5
2	1,5 – 2,0
3	2,0 – 3,5
4	3,5 – 4,0
5	4,0 – 6,0
6	6,0 – 7,0
7	7,0 – 10,0
8	10,0 <

9. melléklet. Áttekintő táblázat a klasszifikációs fa modellek ábráinak mellékletben magadott számozásáról

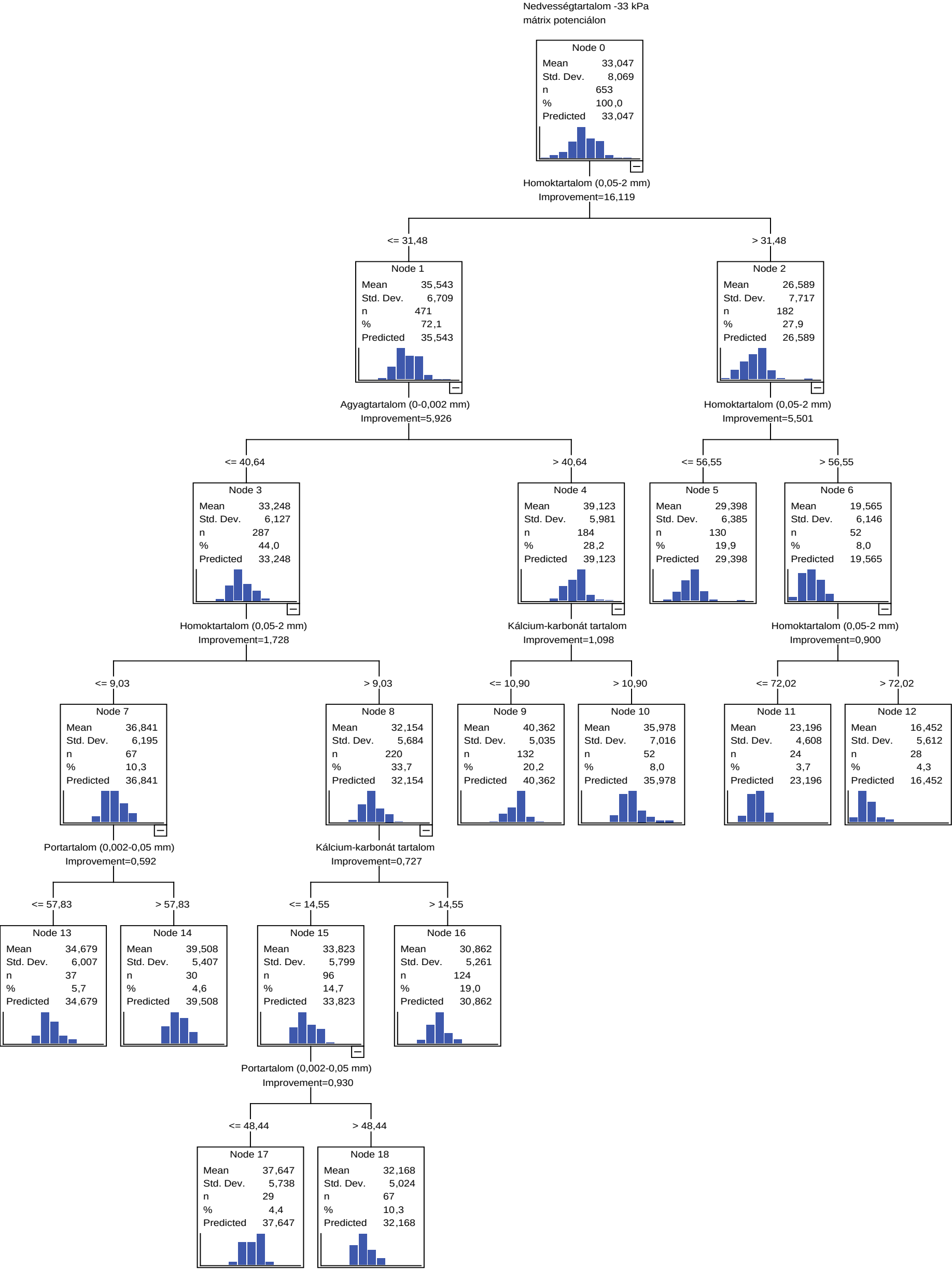
Módszerek	Becsült tulajdonság				Hasznosítható vízkészlet
	$\theta_{-0,1\text{kPa}}$	$\theta_{-33\text{kPa}}$	$\theta_{-1500\text{kPa}}$	$\theta_{-150000\text{kPa}}$	
Szikes és szikes jellegű talajok víztartó képességének becsléséhez					
CRT1 (folytonos változók)	11	12	13	14	15
CRT2 (folytonos változók és altípus)	16	17	18	19	20
CHAID1 (kategória változók és altípus)	21	22	23	24	25
CRT_kat	26	27	28	29	30
Szikes főtípusú és szoloncsákos réti típusú talajok víztartó képességének becsléséhez					
CRT3 (folytonos változók, altípus, feltalaj és altalaj elkülönítése)	43	44	45	46	-
CHAID2 (kategória változók, altípus, feltalaj és altalaj elkülönítése)	47	48	49	50	-
Barna erdőtalajok víztartó képességének becsléséhez					
CRT3 (folytonos változók, altípus, feltalaj és altalaj elkülönítése)	51	52	53	54	-
CHAID2 (kategória változók, altípus, feltalaj és altalaj elkülönítése)	55	56	57	58	-
Csernozjom talajok víztartó képességének becsléséhez					
CRT3 (folytonos változók, altípus, feltalaj és altalaj elkülönítése)	71	72	73	74	-
CHAID2 (kategória változók, altípus, feltalaj és altalaj elkülönítése)	75	76	77	78	-
Réti talajok víztartó képességének becsléséhez					
CRT3 (folytonos változók, altípus, feltalaj és altalaj elkülönítése)	91	92	93	94	-
CHAID2 (kategória változók, altípus, feltalaj és altalaj elkülönítése)	95	96	97	98	-

10. melléklet. Magyarázatok a klasszifikációs fa modellek ábráin szereplő statisztikai fogalmak jelentéséhez.

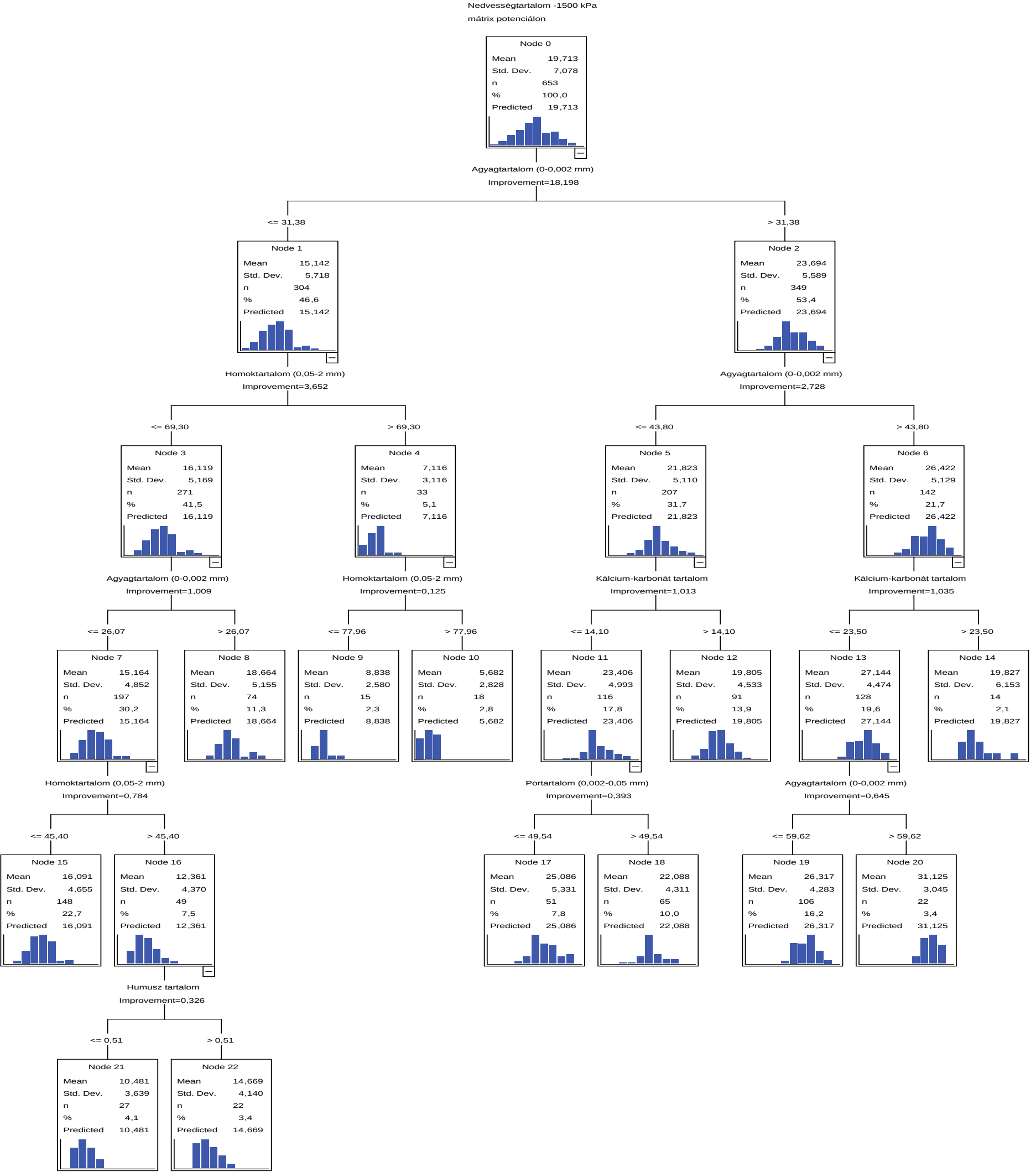
Node:	csomópont száma.
Mean:	a csoportra számított számtani átlagérték, ami mindig a nedvességtartalomra vonatkozik.
Std. dev.:	az átlag szórása.
n:	elemszám az adott csoporton belül.
%:	az adott csoport elemszámának %-os aránya a modellépítéshez vizsgált összes mintához képest.
Predicted:	a csoportra számított becsült érték, ami mindig a nedvességtartalomra vonatkozik.
Improvement:	megmutatja, hogy mennyivel javul a becslés a felosztás figyelembe vételével.
Adj. P-value:	módosított p-érték.
F:	F-próba értéke.
df:	szabadságfokok száma.
missing:	nincs mért érték; azon független változóknál, ahol egyes minták nem rendelkeznek mért értékkel, azok külön kategóriát képeznek a CHAID módszernél.



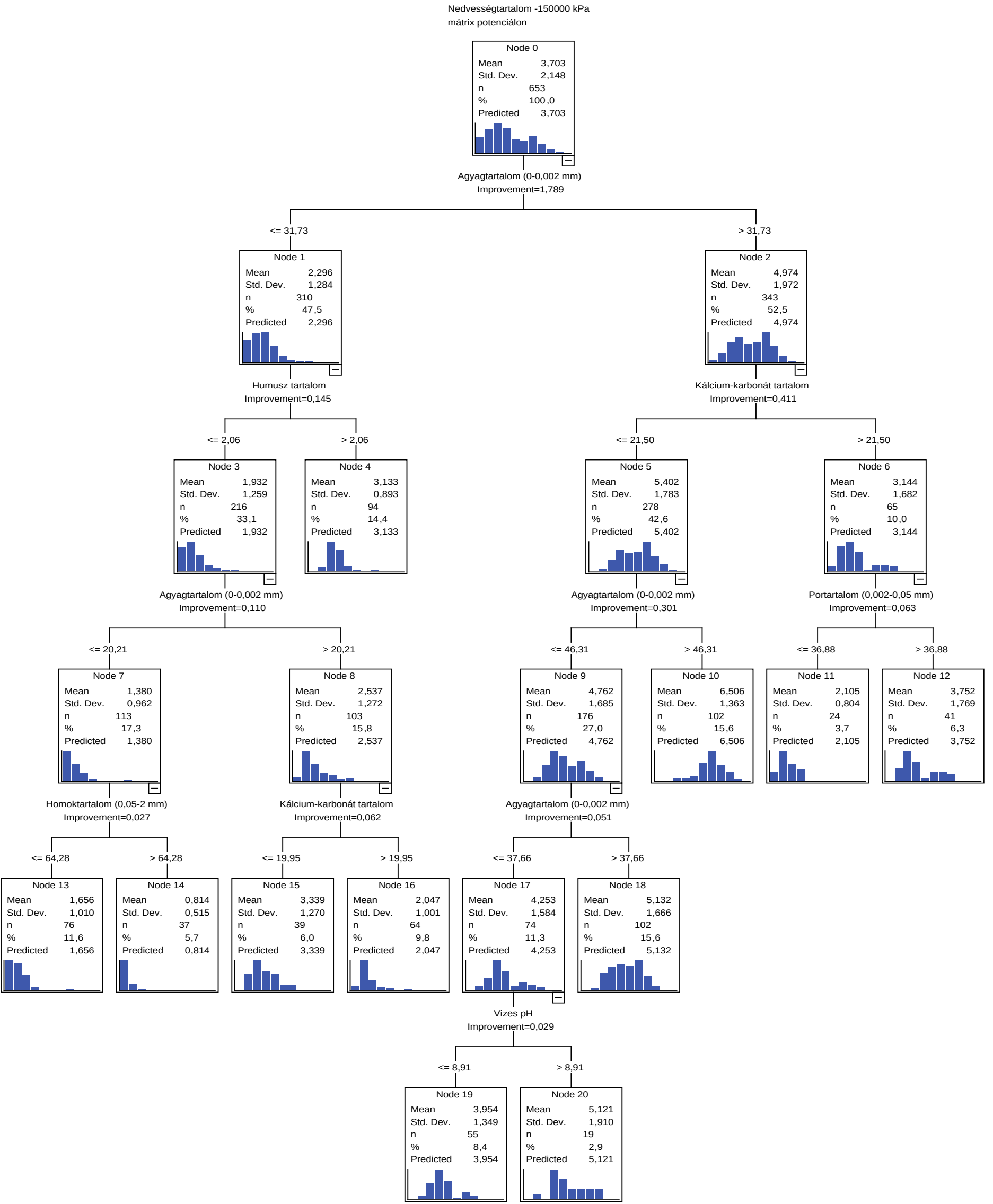
11. melléklet. Szikes talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT1 modellel (folytonos talajtulajdonságok alapján). Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



12. melléklet. Szikes talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT1 modellel (folytonos talajtulajdonságok alapján). Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

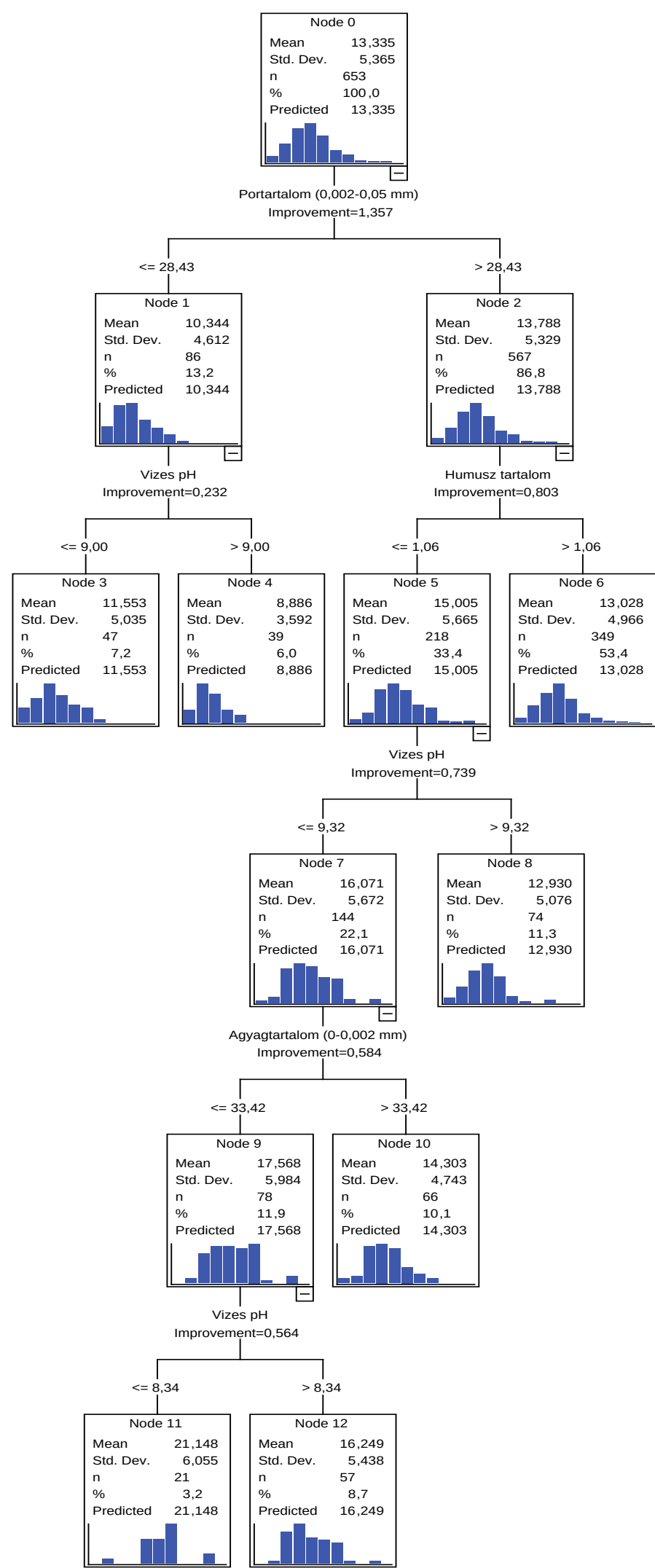


13. melléklet. Szikes talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT1 modellel (folytonos talajtulajdonságok alapján).
Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

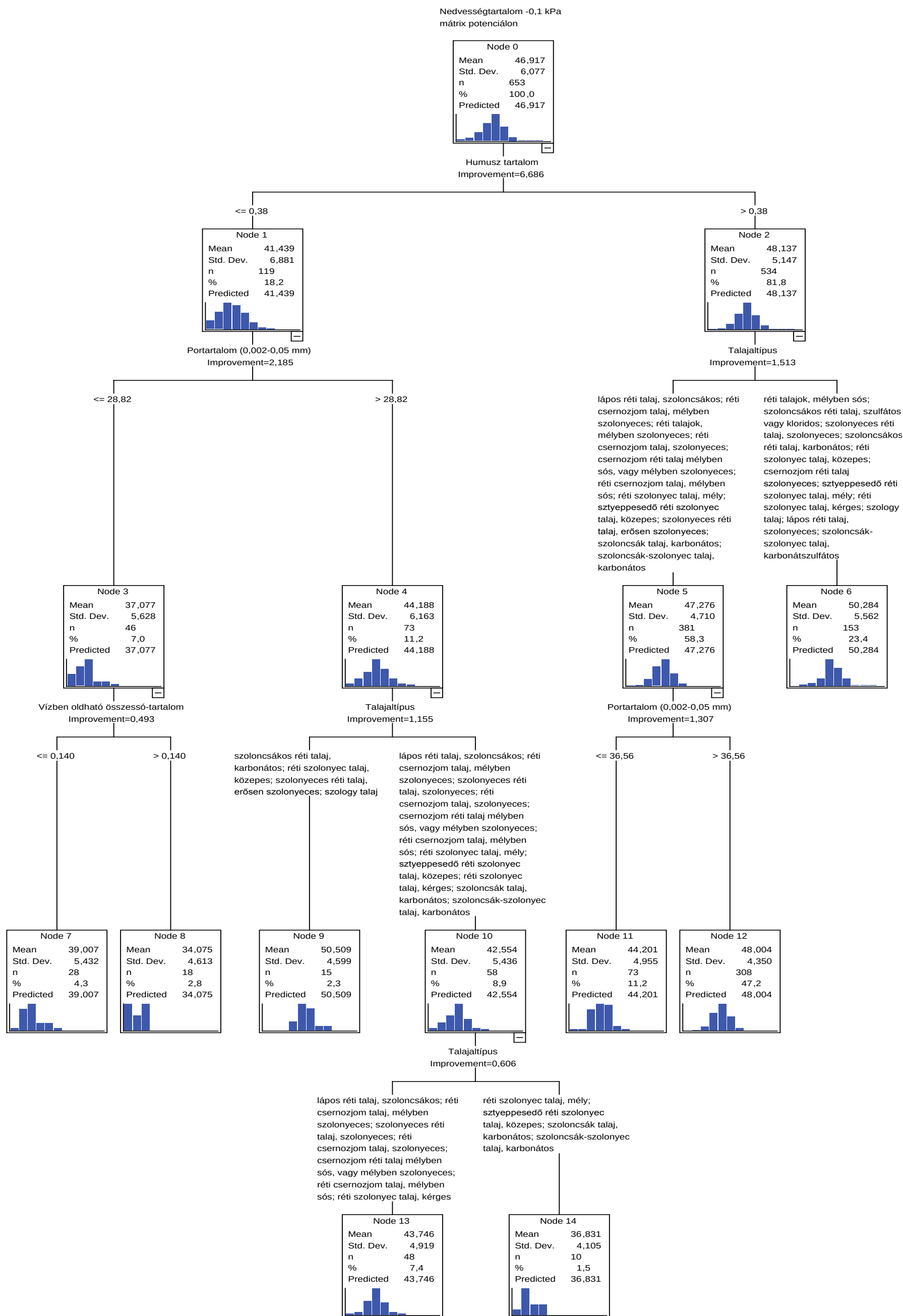


14. melléklet. Szikes talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT1 modellel (folytonos talajtulajdonságok alapján). Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

Hasznosítható vízkészlet



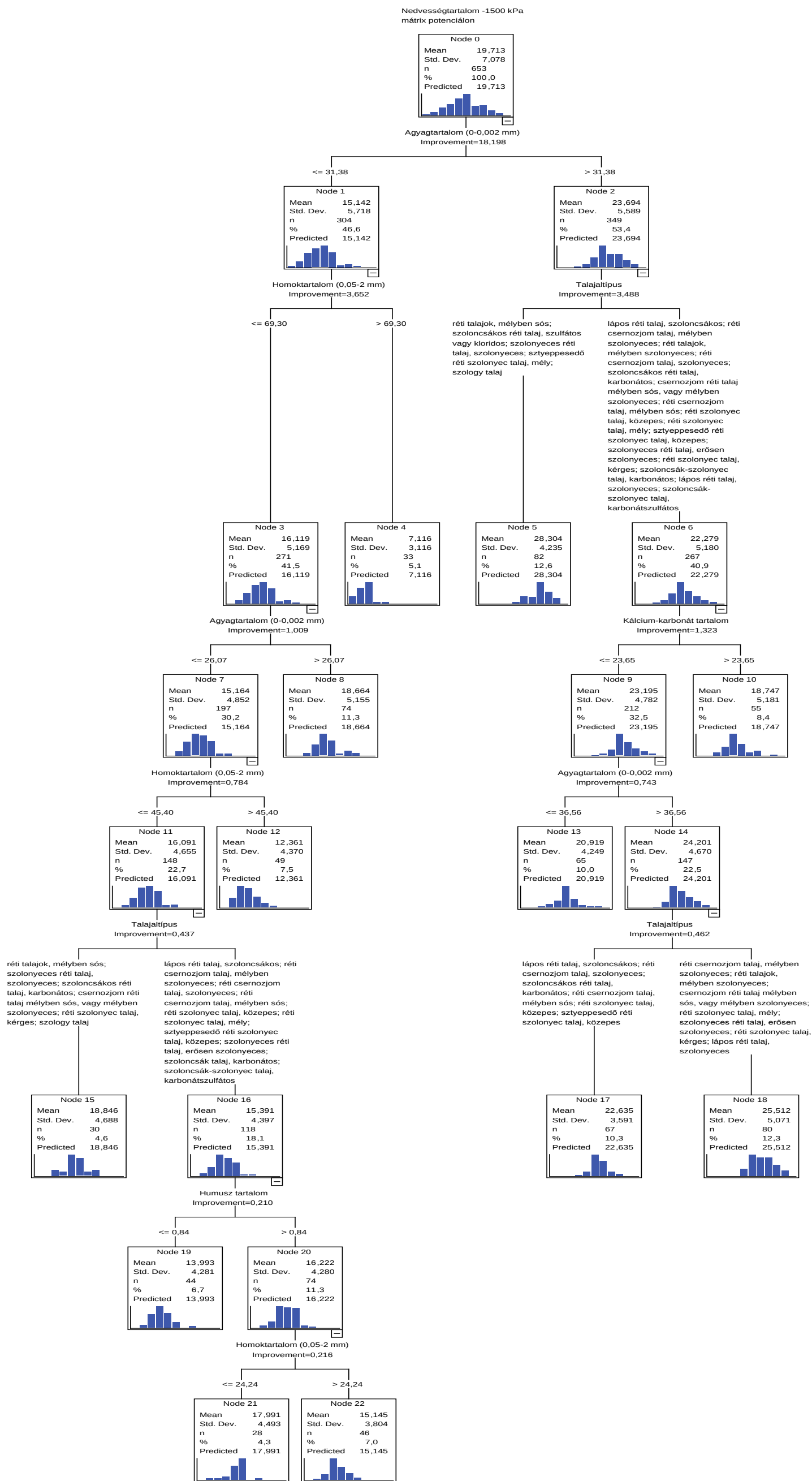
15. melléklet. Szikes talajok hasznosítható vízkészletének becslése a CRT1 modellel (folytonos talajtulajdonságok alapján). Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



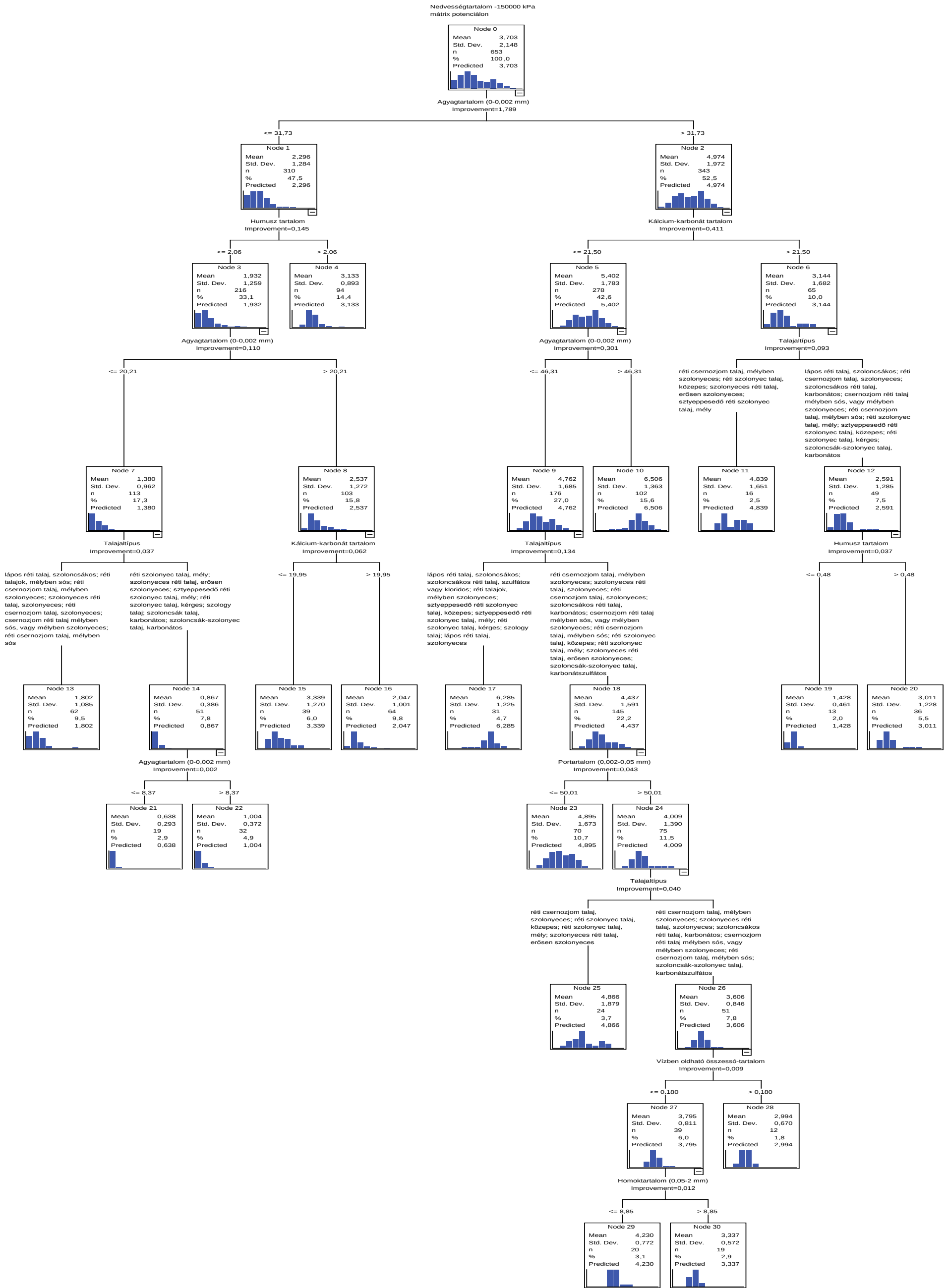
16. melléklet. Szikes talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT2 modellel (folytonos talajtulajdonságok és a talaj altípusa alapján). Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



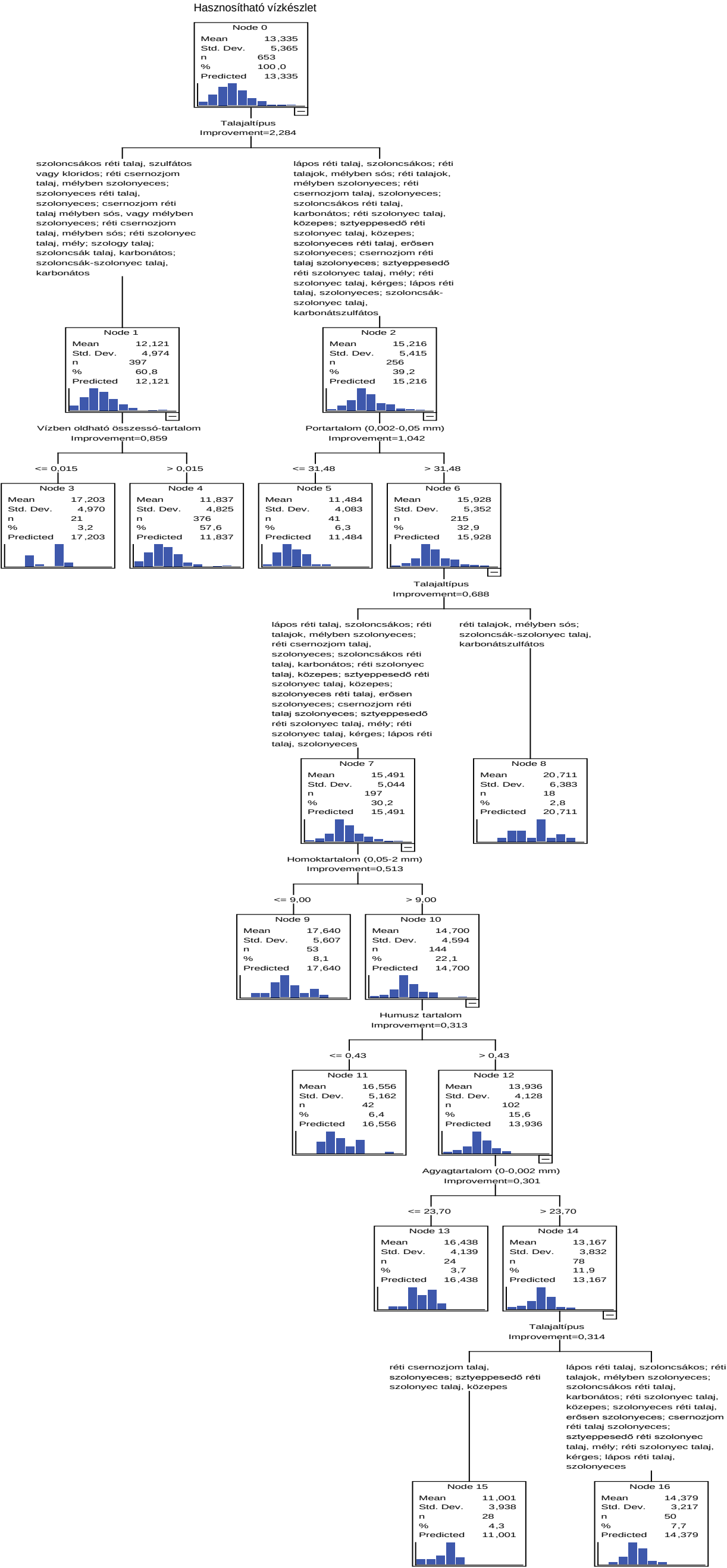
17. melléklet. Szikes talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT2 modellel (folytonos talajtulajdonságok és a talaj altípusa alapján). Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



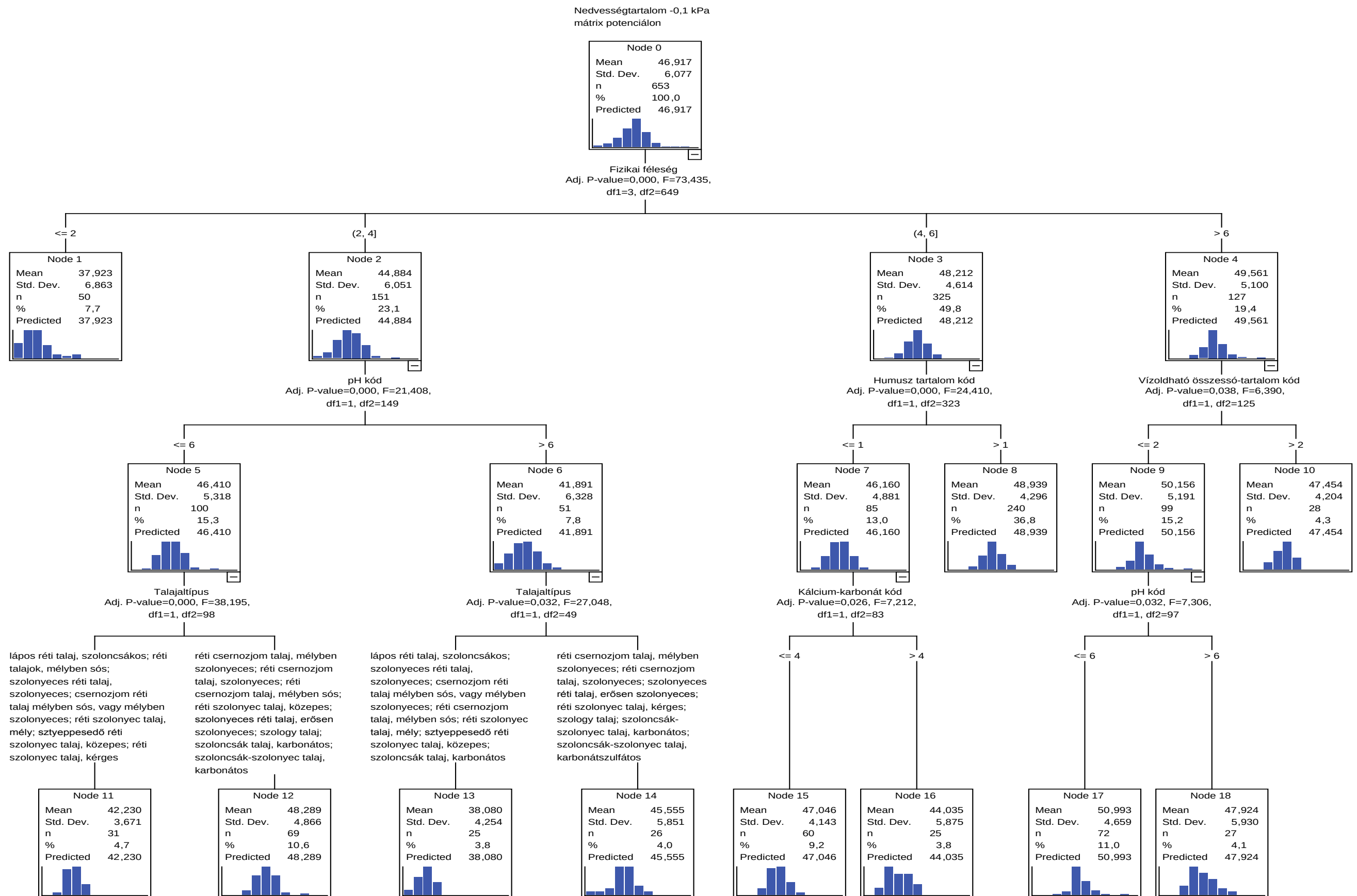
18. melléklet. Szikes talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT2 modellel (folytonos talajtulajdonságok és a talaj altípusa alapján). Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



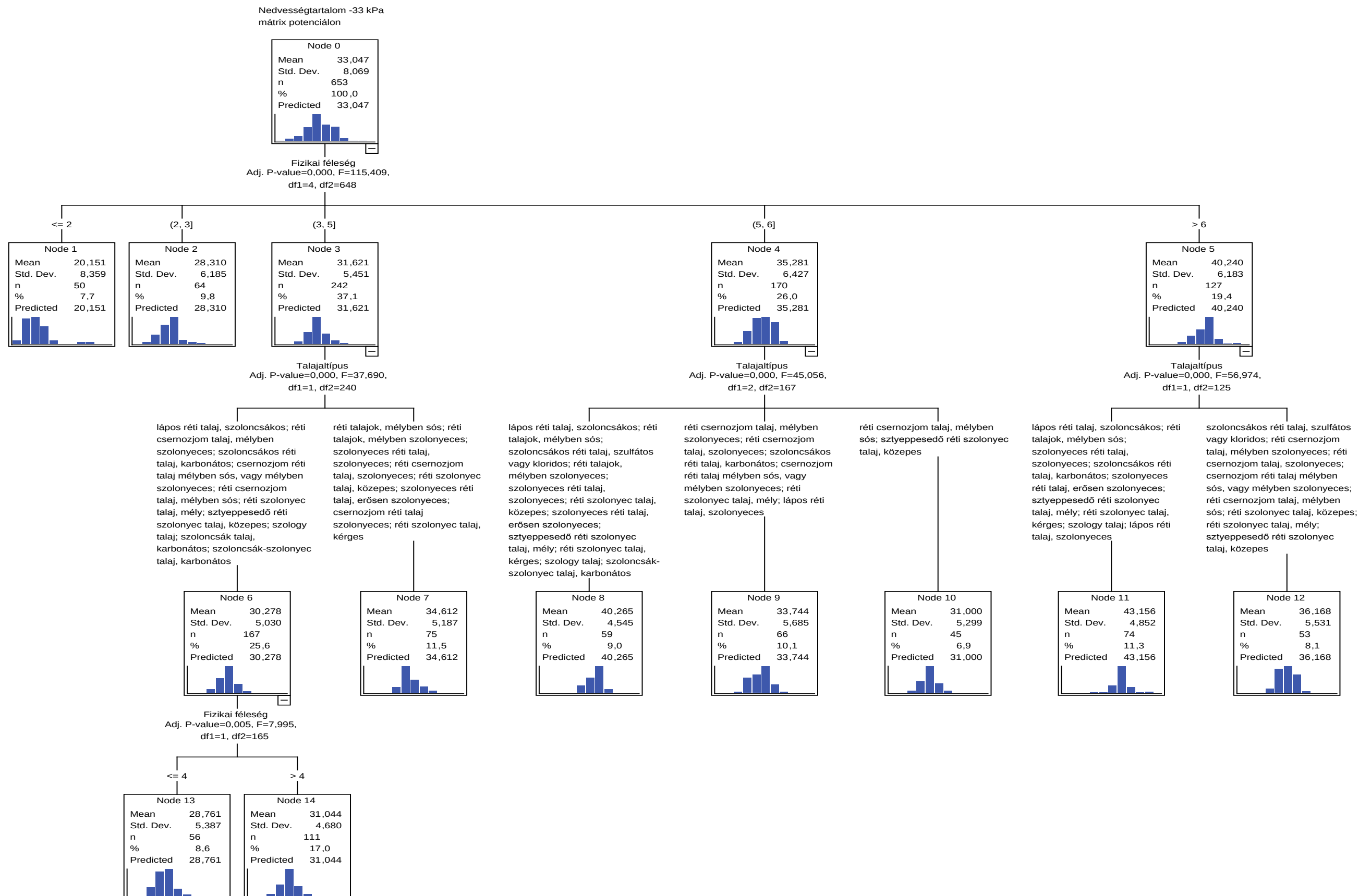
19. melléklet. Szikes talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT2 modellel (folytonos talajtulajdonságok és a talaj altípusa alapján). Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



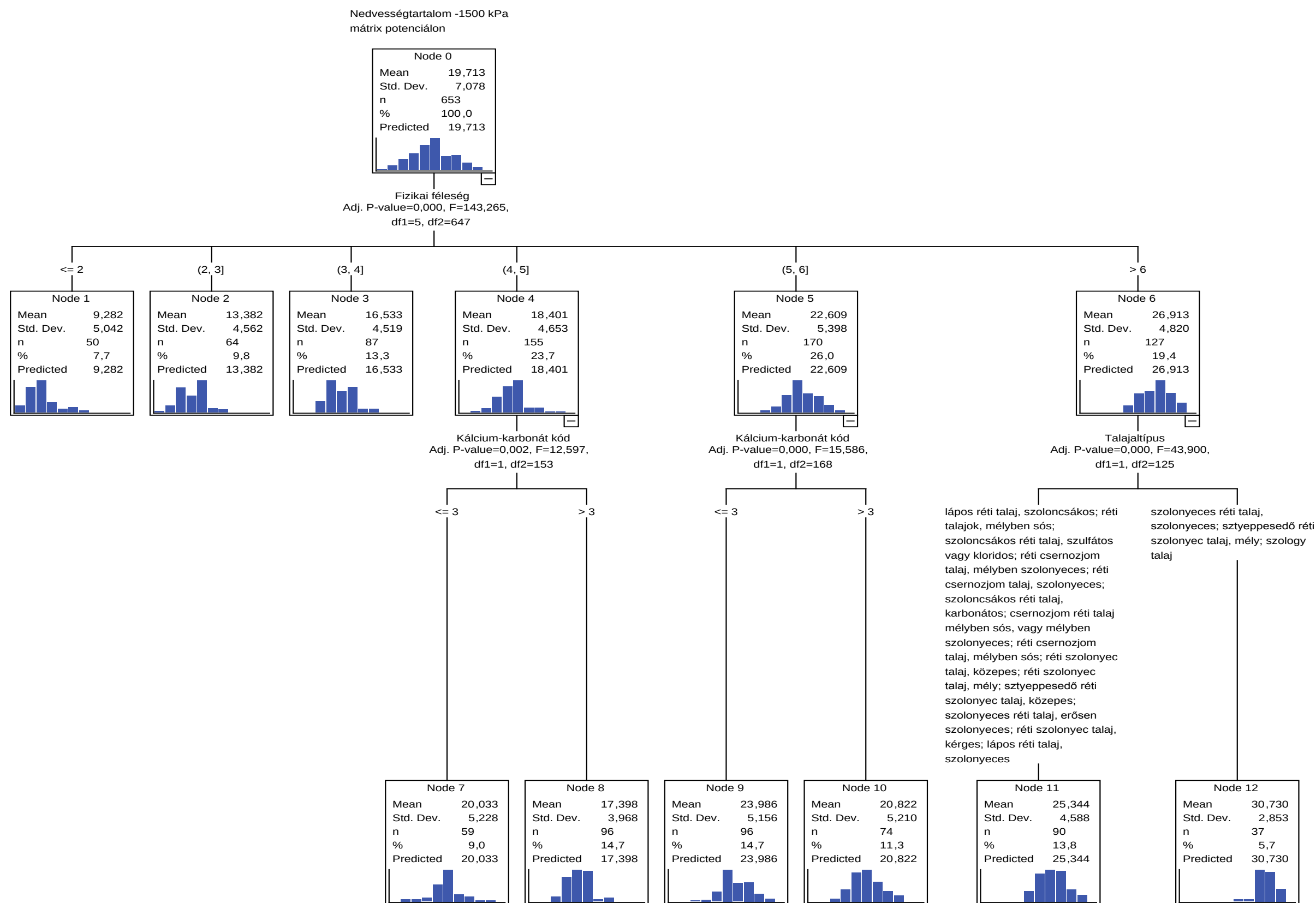
20. melléklet. Szikes talajok hasznosítható vízkészletének becslése a CRT2 modellel (folytonos talajtulajdonságok és a talaj altípusa alapján). Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



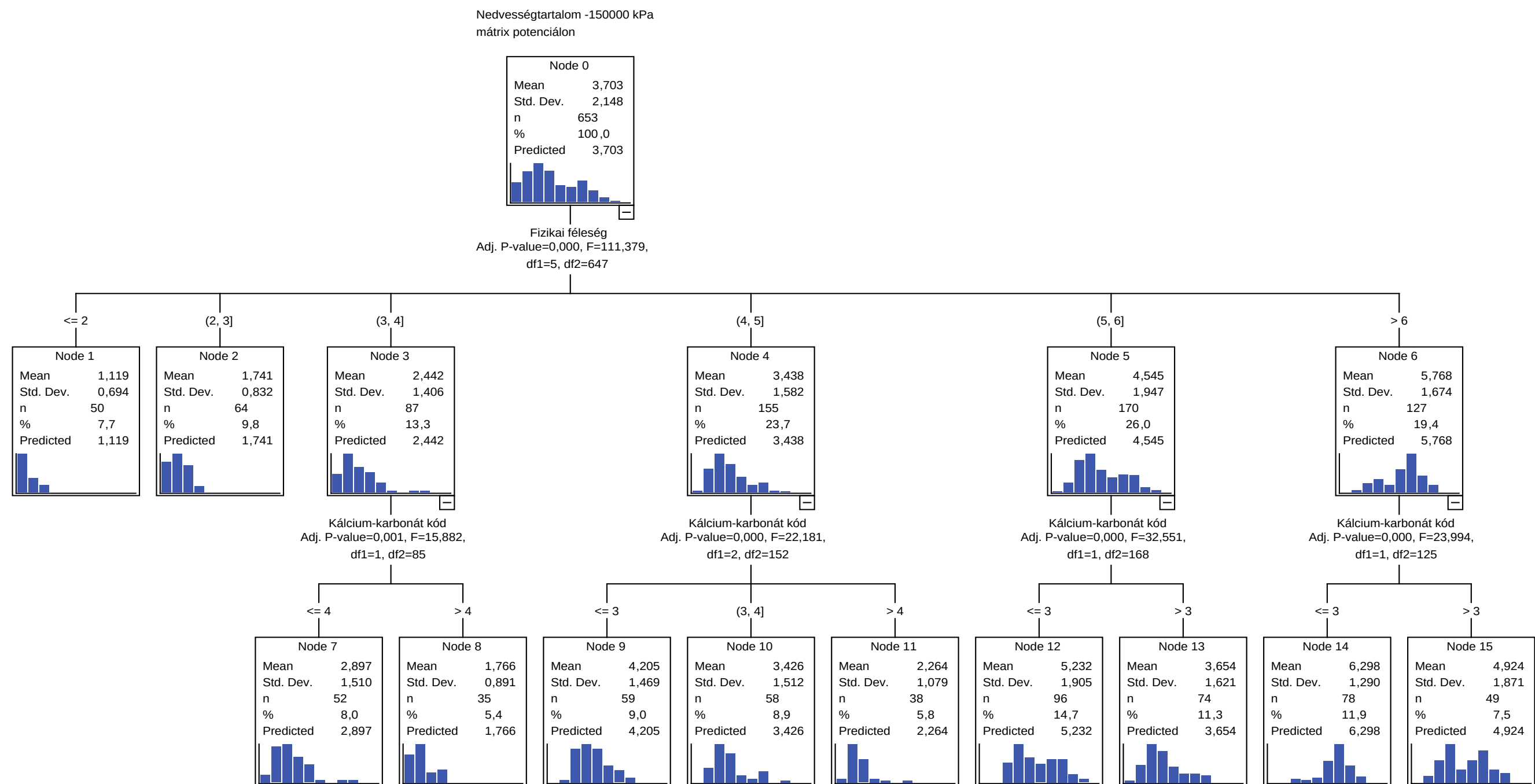
21. melléklet. Szikes talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CHAID1 modellel (kategória változók és a talaj altípusa alapján).
A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



22. melléklet. Szikes talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CHAID1 modellel (kategória változók és a talaj altípusa alapján).
A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1- 5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

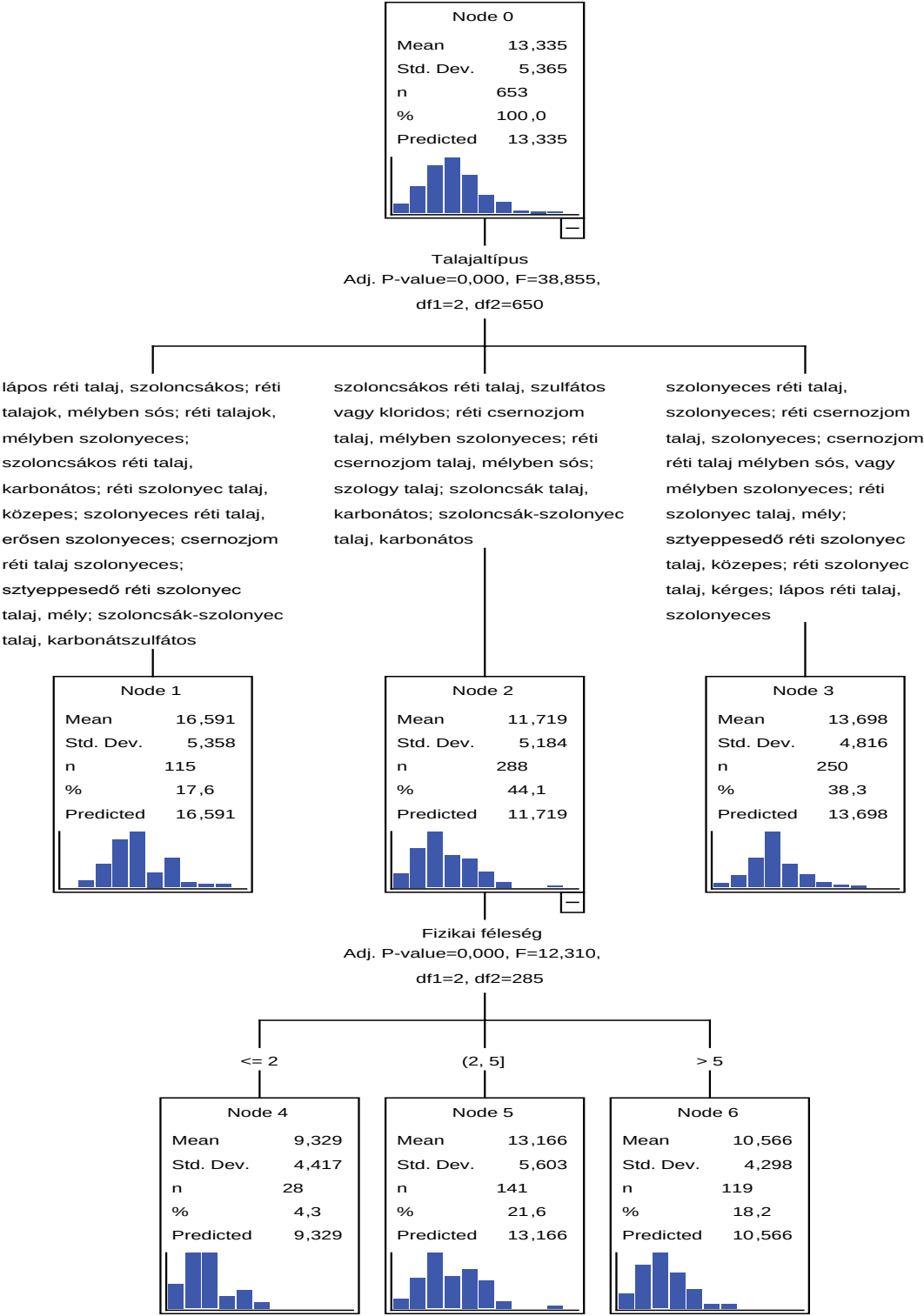


23. melléklet. Szikes talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CHAID1 modellel (kategória változók és a talaj altípusa alapján).
A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

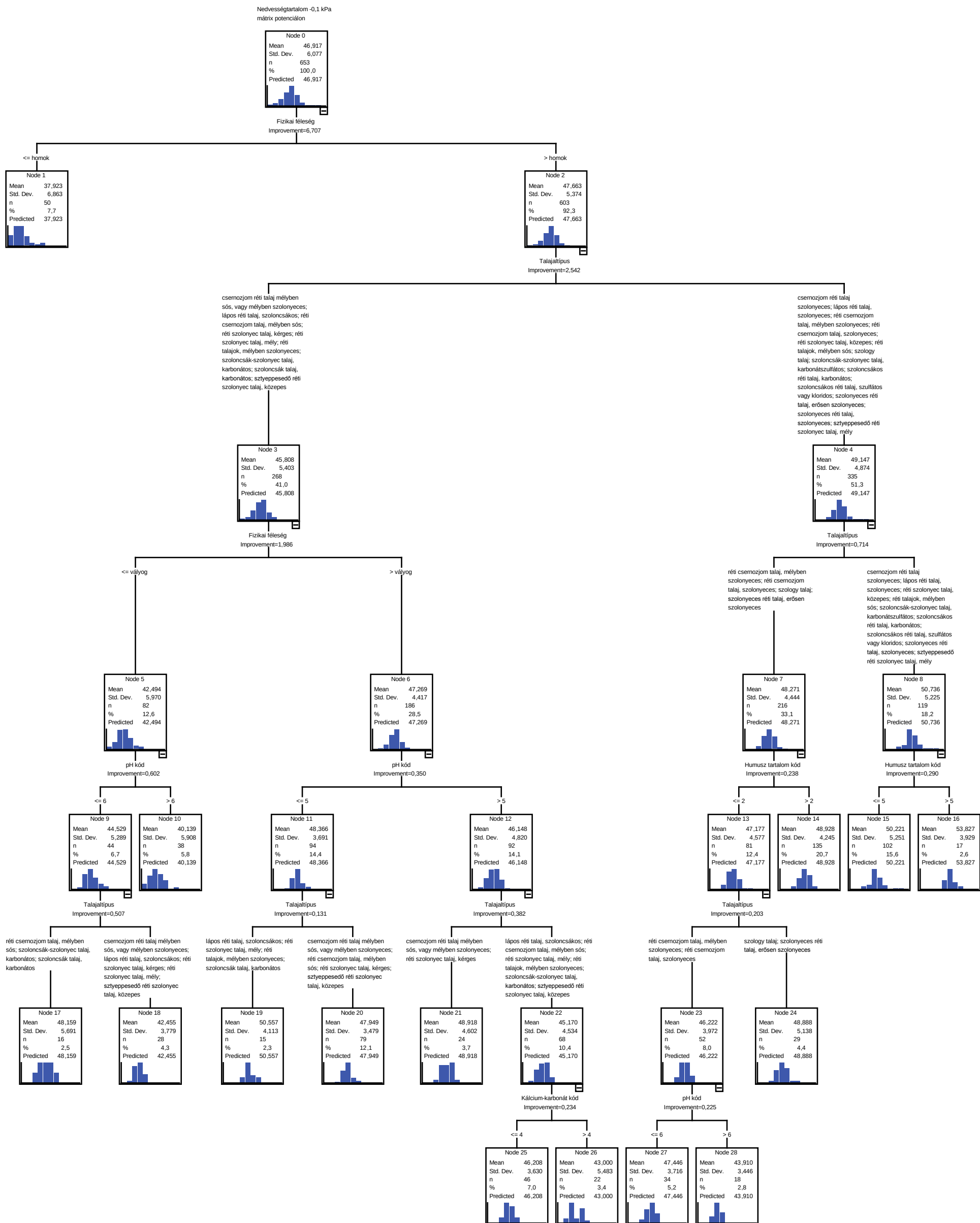


24. melléklet. Szikes talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CHAID1 modellel (kategória változók és a talaj altípusa alapján).
A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

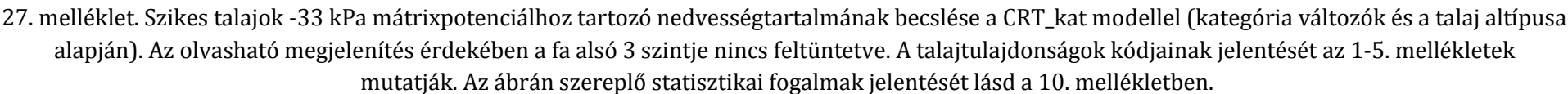
Hasznosítható vízkészlet

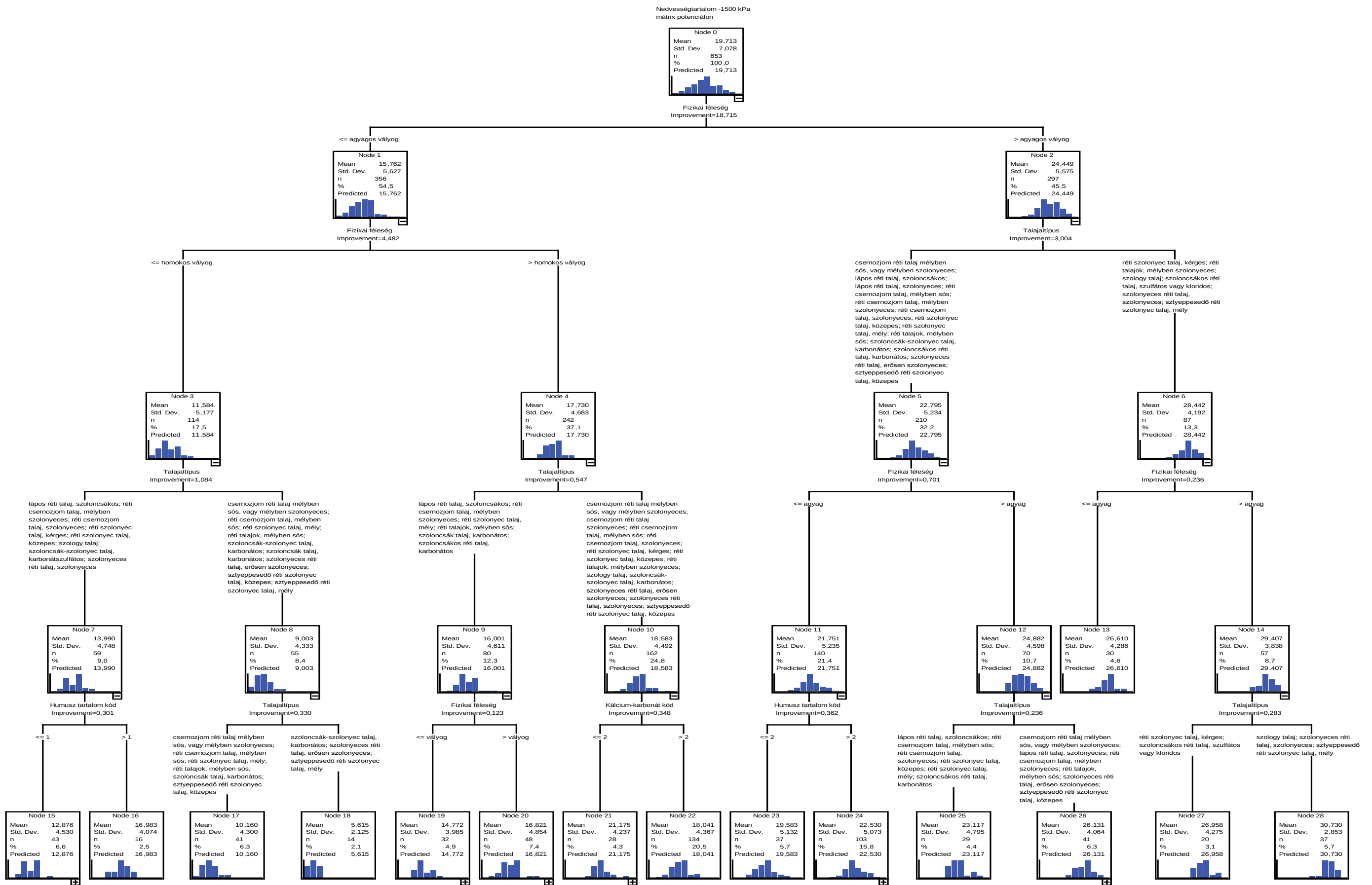


25. melléklet. Szikes talajok hasznosítható vízkészletének becslése a CHAID1 modellel (kategória változók és a talaj altípusa alapján). A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

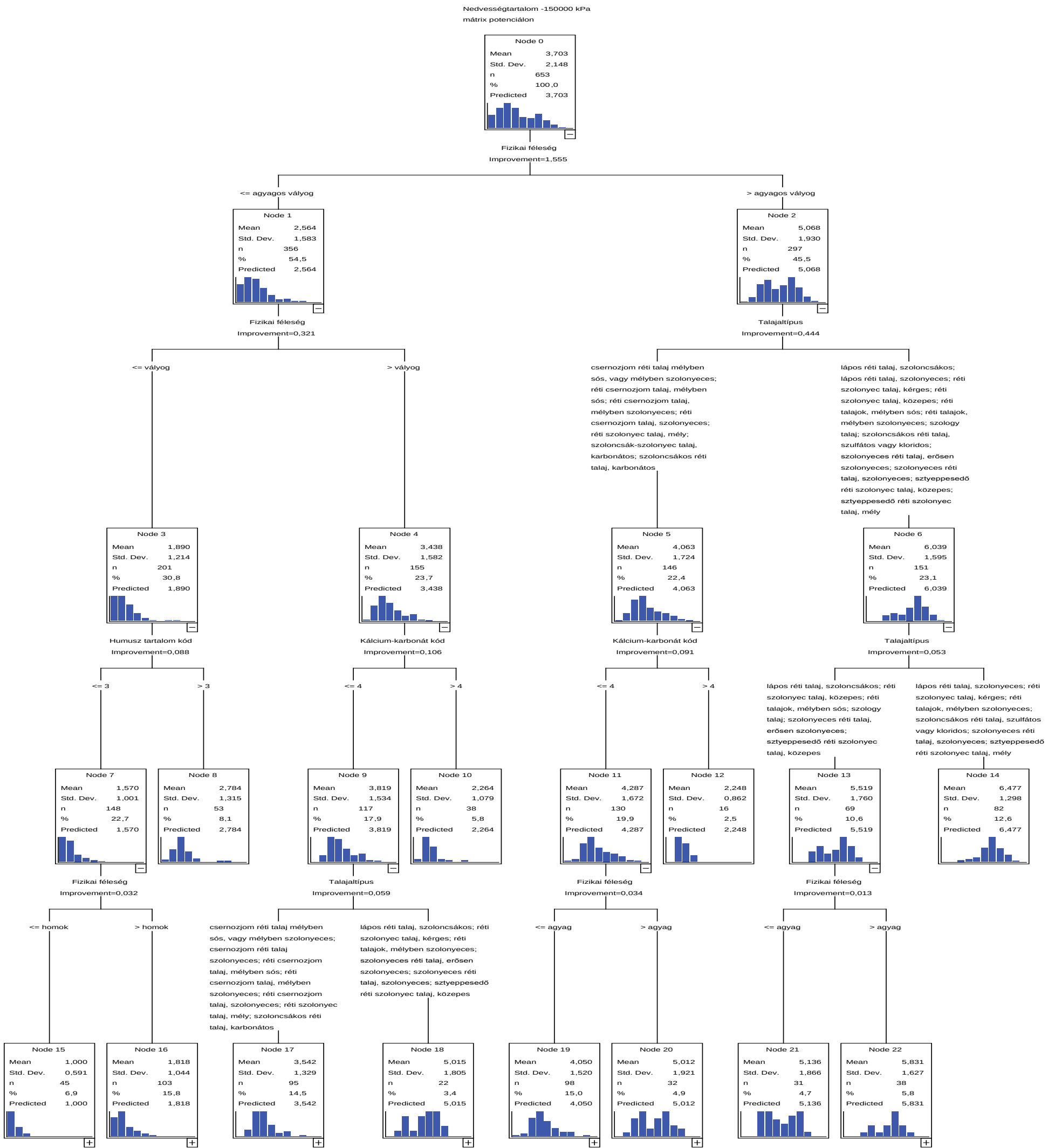


26. melléklet. Szikes talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT_kat modellel (kategória változók és a talaj altípusa alapján).A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

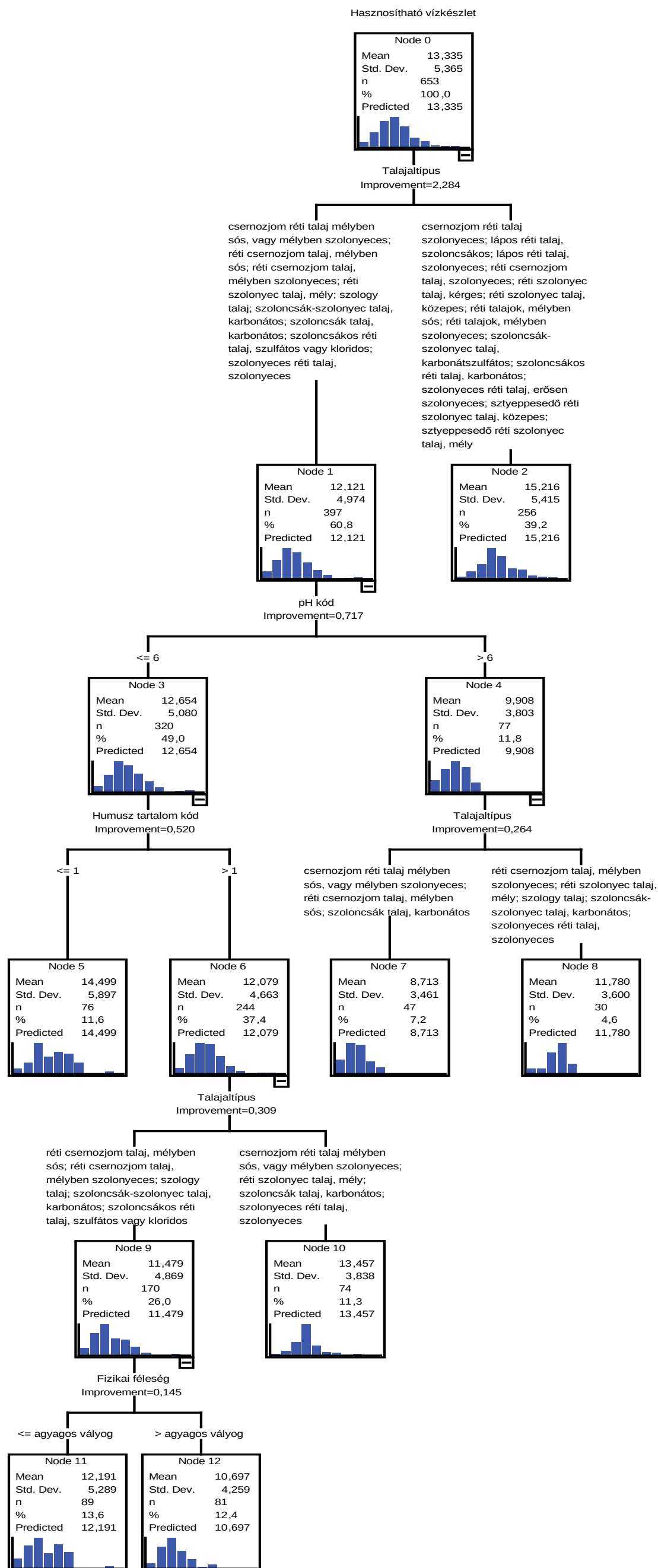




28. melléklet. Szikes talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT_{kat} modellel (kategória változók és a talaj altípusa alapján). Az olvasható megjelenítés érdekében a fa legalsó szintje nincs feltüntetve. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



29. melléklet. Szikes talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó nedvességtartalmának becslése a CRT_kat modellel (kategória változók és a talaj altípusa alapján). Az olvasható megjelenítés érdekében a fa 2 alsó szintje nincs feltüntetve. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5.mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



30. melléklet. Szikes talajok hasznosítható vízkészletének becslése a CRT_kat modellel (kategória változók és a talaj altípusa alapján). A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

31. melléklet. Pedotranszfer függvények a szikes talajok A és B szintjeire, a vízdíhatóság-tartalom és térfogattömeg figyelembe vételével.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 65,072 - (0,038 * \text{homok}) + (0,001 * \text{por}^2) - (0,669 * \text{humusz}^{-1}) + (9,428 * \ln(\text{pH})) - (26,274 * \text{térfogattömeg})$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 45,902 + (0,277 * \text{agyag}) - (15,733 * \text{térfogattömeg}) + (0,001 * \text{por}^2) + (4,214 * \text{só}) - (11,655 * \text{por}^{-1}) - (0,066 * \text{CaCO}_3) - (0,799 * \text{humusz})$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 10,639 + (0,329 * \text{agyag}) - (2,461 * \text{térfogattömeg}^2) + (0,001 * \text{por}^2) - (0,001 * \text{CaCO}_3^2) + (0,002 * \text{agyag} * \text{homok})$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 0,703 + (0,094 * \text{agyag}) - (0,053 * \text{CaCO}_3) + (0,019 * \text{por}) - (0,722 * \text{homok}^{-1})$$

$$\text{DV} = -2,207 + (17,850 * \text{térfogattömeg}^{-1}) - (1,159 * \ln(\text{humusz})) + (0,065 * \text{por}) + (4,739 * \text{só}^2)$$

32. melléklet. Pedotranszfer függvények a szikes talajok A és B szintjeire, a vízdíhatóság-tartalom figyelembe vételével, térfogattömeg nélkül.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 51,345 - (1,473 * \text{humusz}^{-1}) - (0,125 * \text{homok}) + (19,290 * \text{agyag}^{-1}) - (0,001 * \text{CaCO}_3^2)$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 8,869 + (0,577 * \text{agyag}) + (0,303 * \text{por}) - (0,075 * \text{CaCO}_3) - (0,006 * \text{agyag} * \text{por}) + (22,681 * \text{agyag}^{-1}) + (3,206 * \text{só})$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 7,364 + (0,443 * \text{agyag}) - (0,544 * \text{humusz}^{-1}) + (0,002 * \text{por}^2) - (0,001 * \text{CaCO}_3^2) - (0,003 * \text{agyag} * \text{por})$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 0,703 + (0,094 * \text{agyag}) - (0,053 * \text{CaCO}_3) + (0,019 * \text{por}) - (0,722 * \text{homok}^{-1})$$

$$\text{DV} = 4,447 + (2,149 * \ln(\text{por})) + (4,877 * \text{só}^2) + (13,971 * \text{agyag}^{-1})$$

33. melléklet. A szikes talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt átlagos négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT_kat	653	21,76
CRT1	653	22,62
CHAID1	653	22,66
CRT2	653	23,01
LR1	639	24,03

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

34. melléklet. A szikes talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becsló adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslo módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok	
		1	2
CRT2	653	26,29	
CRT_kat	653	29,56	29,56
CHAID1	653	30,13	30,13
CRT1	653	31,50	31,50
LR1	639		34,08

35. melléklet. A szikes talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becsló adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslo módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*	
		1	2
CRT_kat	653	17,51	
CRT2	653	19,49	19,49
CRT1	653	20,11	20,11
CHAID1	653		21,54
LR1	653		22,51

36. melléklet. A szikes talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becsló adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslo módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok		
		1	2	3
CRT2	653	1,38		
CRT1	653	1,62	1,62	
CRT_kat	653	1,63	1,63	
LR1	653		1,76	1,76
CHAID1	653			2,05

37. melléklet. A szikes talajok hozzáférhető vízkészletének közvetlen becslésére és közvetett számítására (a -33 és -1500 kPa-hoz tartozó becsült víztartó képességekből) kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becsülő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becsülő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT2-el becsült	653	22,41
CRT2 alapján számított	653	23,71
CRT1-el becsült	653	24,46
CRT_kat-val becsült	653	24,50
CHAID1-el becsült	653	24,73
CHAID1 alapján számított	653	25,44
CRT_kat alapján számított	653	26,49
LR1-el becsült	639	26,55
CRT1 alapján számított	653	26,77
LR1 alapján számított	639	27,48

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

38. melléklet. A szikes talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becsülő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CHAID1	76	17,83
CRT_kat	76	20,14
LR1	76	21,94
CRT1	76	22,11
CRT2	76	22,72

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

39. melléklet. A szikes talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becsülő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT_kat	76	24,35
CHAID1	76	25,40
CRT2	76	27,71
LR1	75	34,28
CRT1	76	41,47

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

40. melléklet. A szikes talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becsülő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT_kat	76	26,18
CHAID1	76	26,65
CRT2	76	27,73
LR1	76	27,81
CRT1	76	29,51

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

41. melléklet. A szikes talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

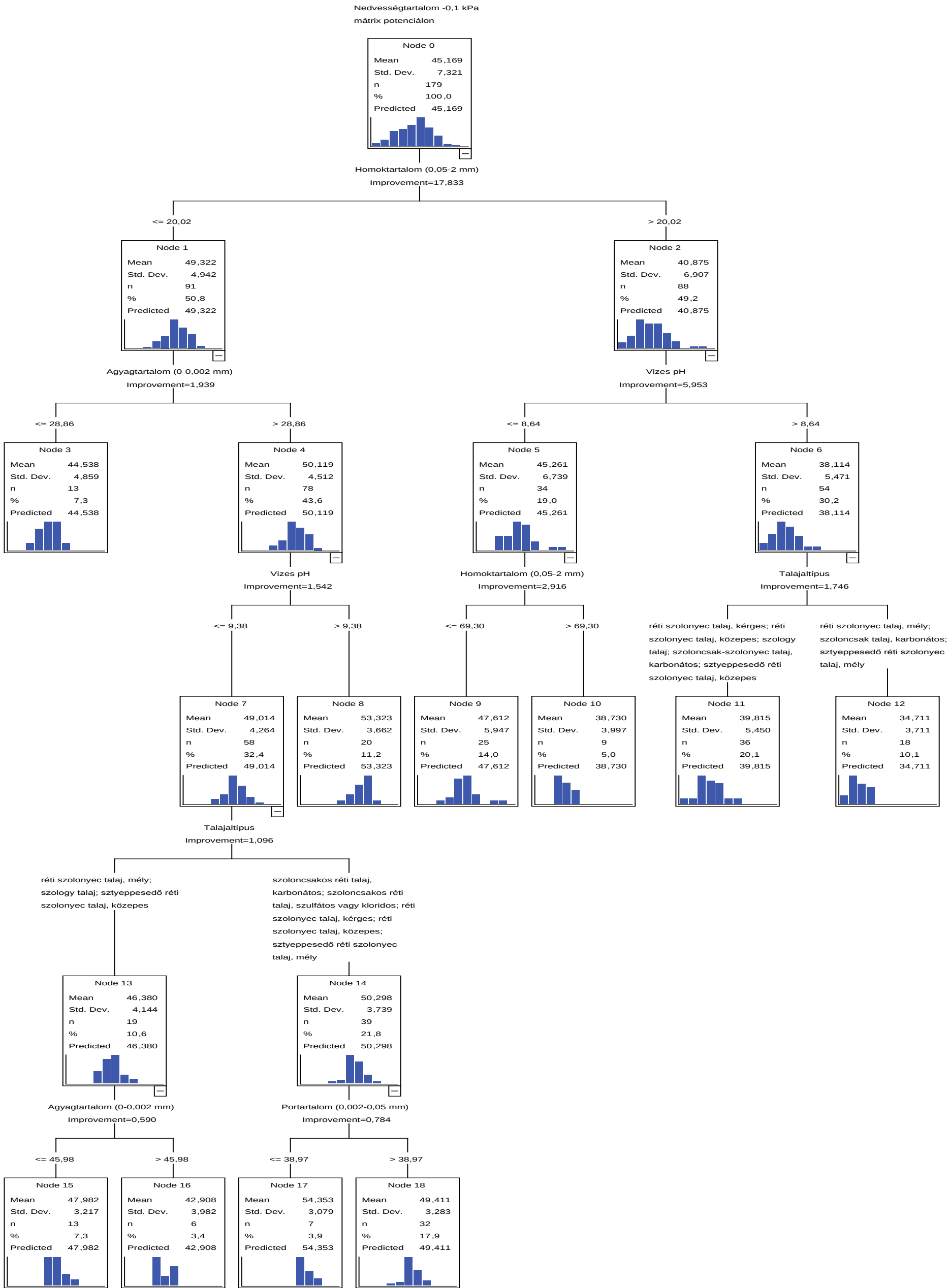
Becsülő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT_kat	76	1,56
CHAID1	76	1,60
LR1	76	1,82
CRT1	76	1,87
CRT2	76	2,28

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

42. melléklet. A szikes talajok minták hozzáférhető vízkészletének közvetlen becslésére és közvetett számítására (a -33 és -1500 kPa-hoz tartozó becsült víztartó képességekből) kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt átlagos négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becsítő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
LR1 alapján számított	75	16,45
CRT_kat-val becsült	76	18,72
LR1-el becsült	75	19,38
CRT2-el becsült	76	19,73
CHAID1-el becsült	76	20,19
CRT1-el becsült	76	20,27
CHAID1 alapján számított	76	20,98
CRT2 alapján számított	76	21,20
CRT_kat alapján számított	76	22,41
CRT1 alapján számított	76	23,29

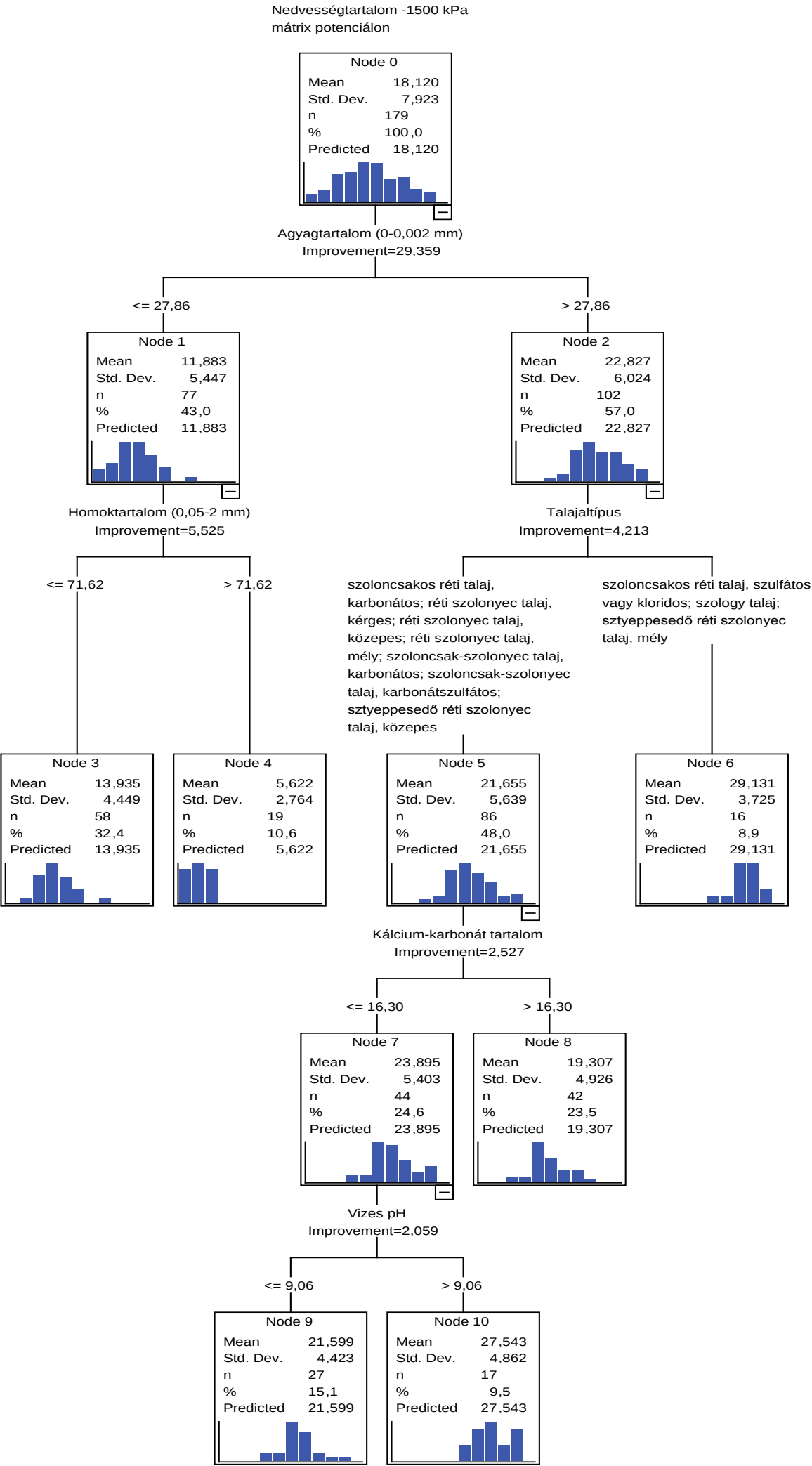
*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.



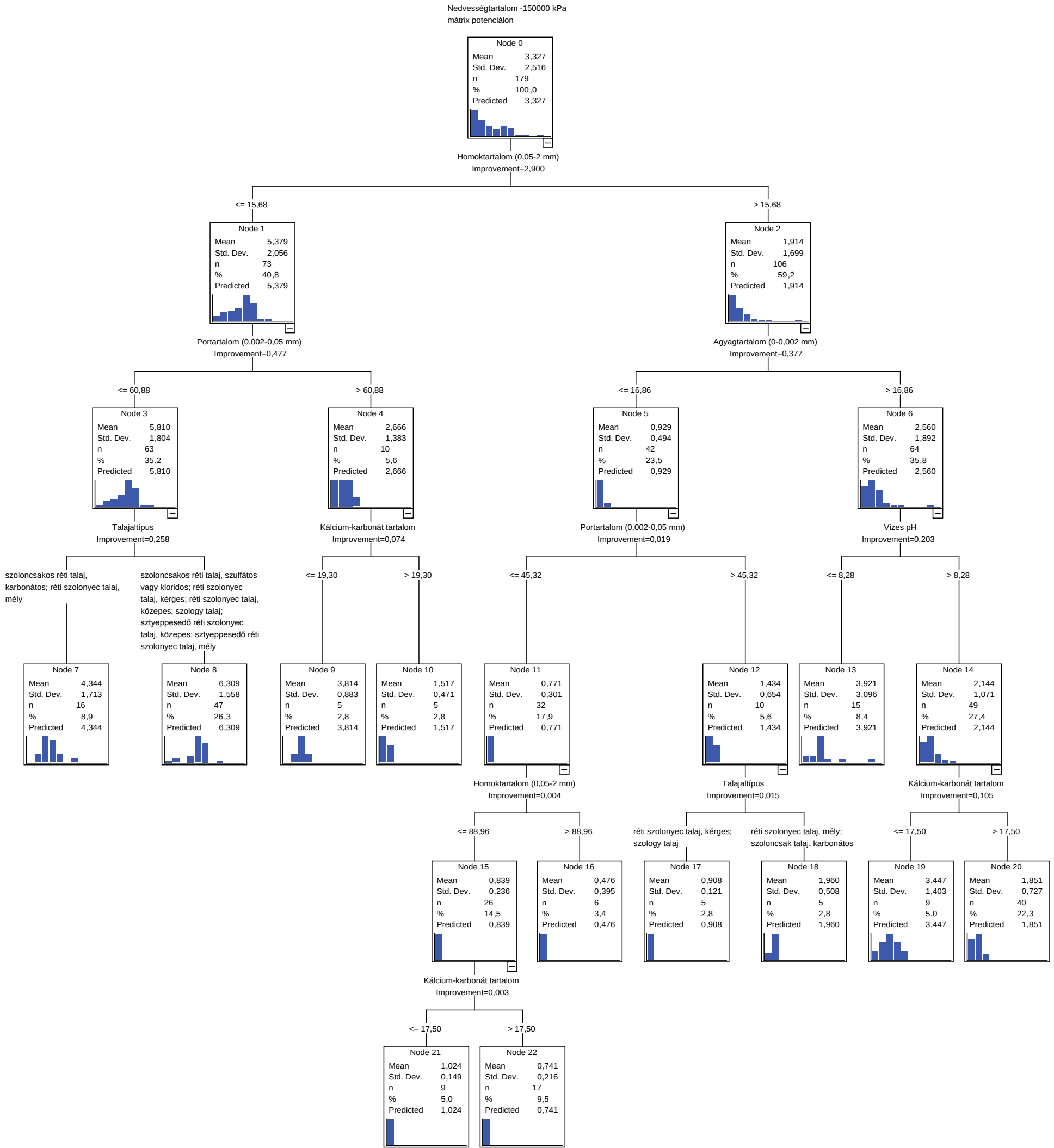
43. melléklet. Szikes főtípusú és szoloncsákos réti talajok -0,1 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT2 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



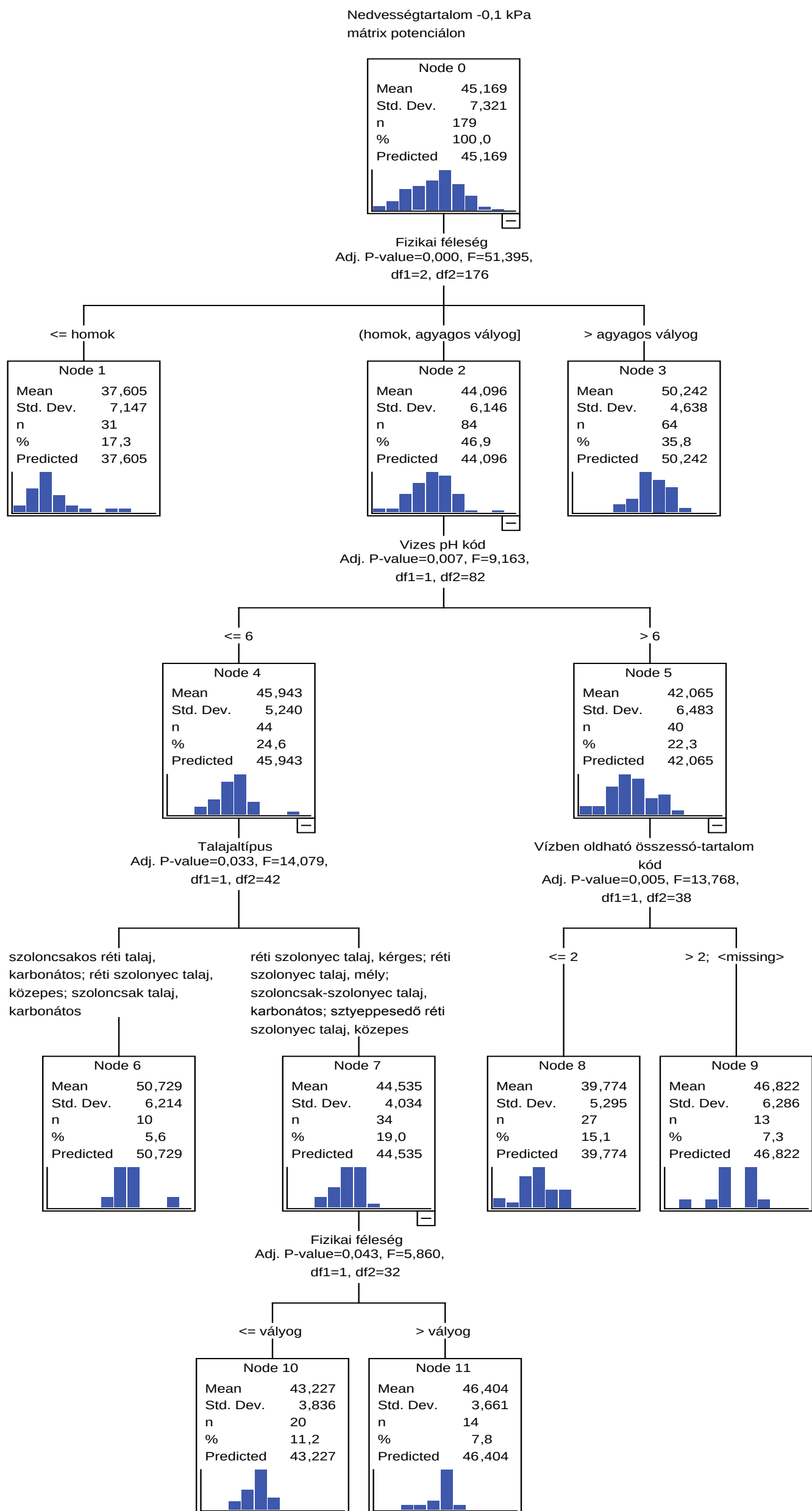
44. melléklet. Szikes főtípusú és szoloncsákos réti talajok -33 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT2 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



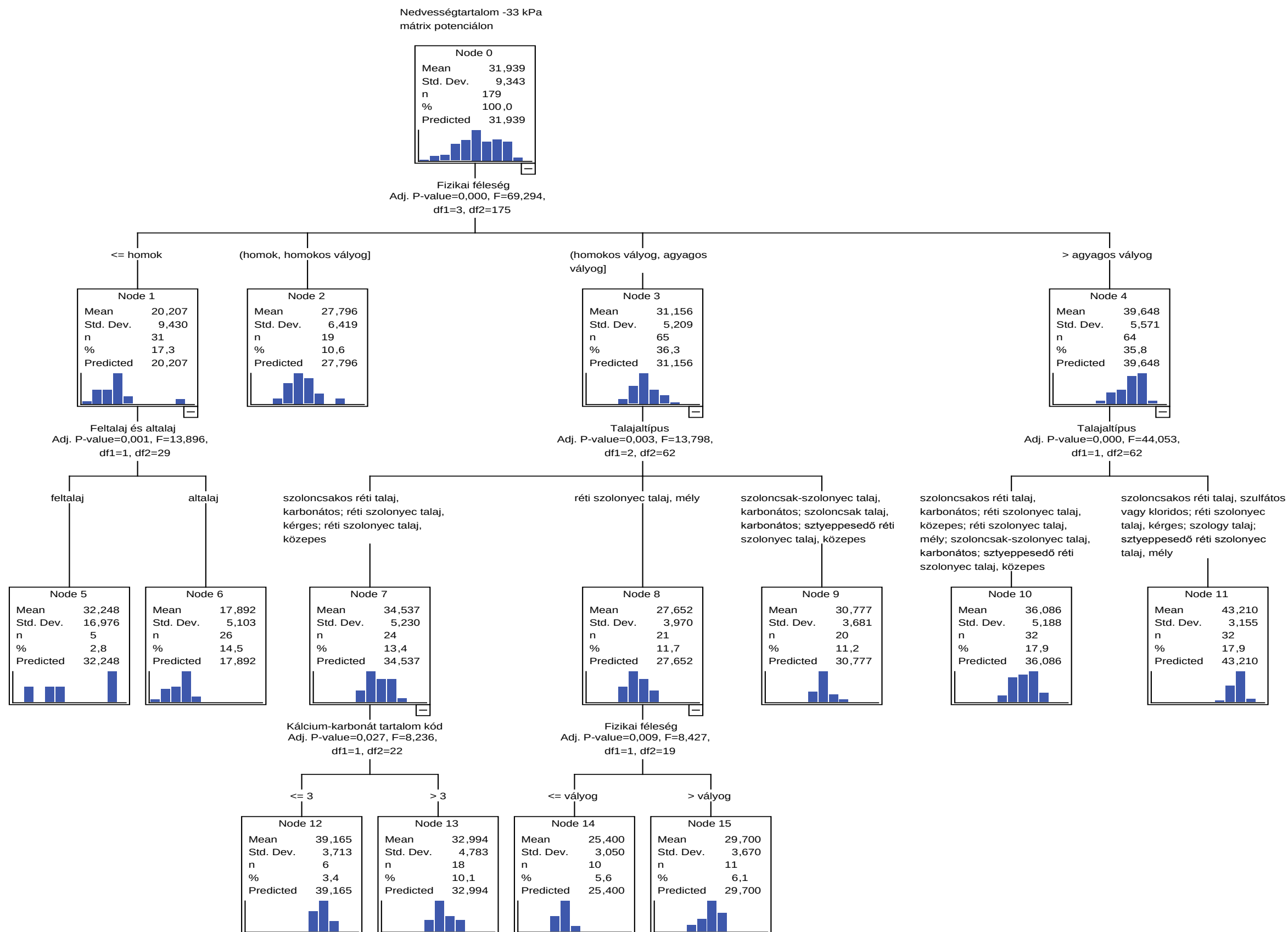
45. melléklet. Szikes főtípusú és szoloncsákos réti talajok -1500 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT2 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



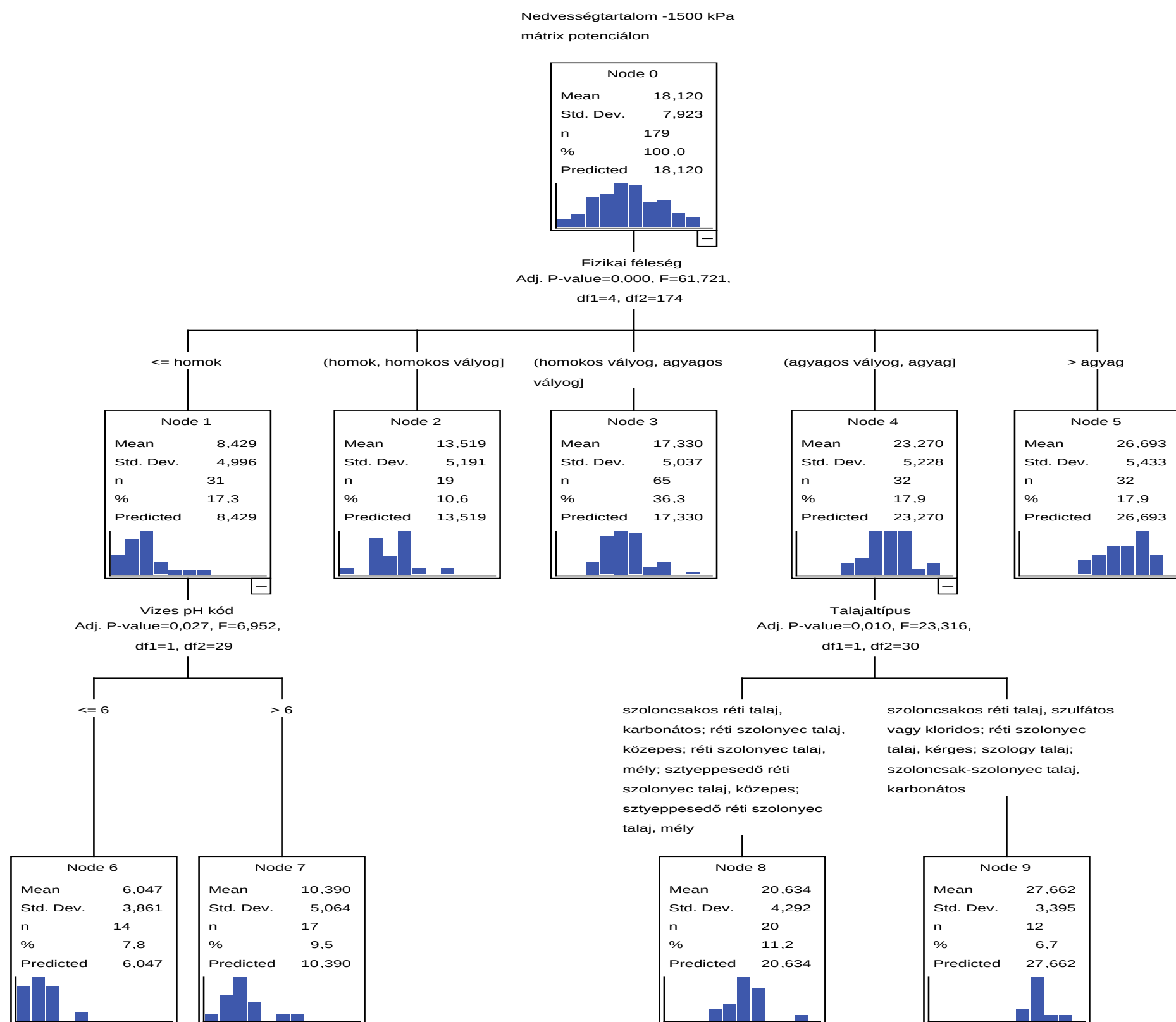
46. melléklet. Szikes főtípusú és szoloncsákos réti talajok -150000 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT2 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



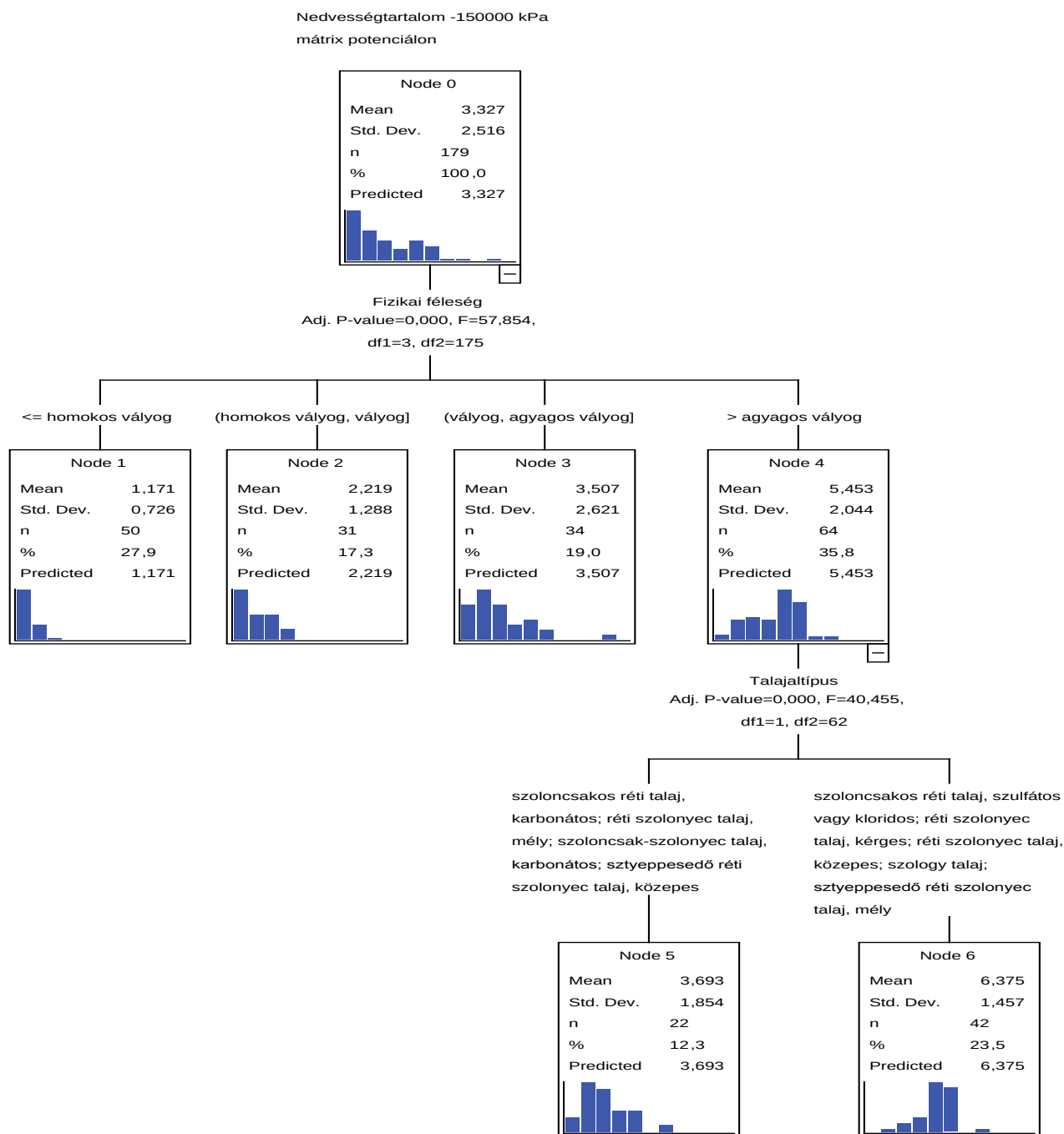
47. melléklet. Szikes főtípusú és szoloncsákos réti talajok -0,1 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



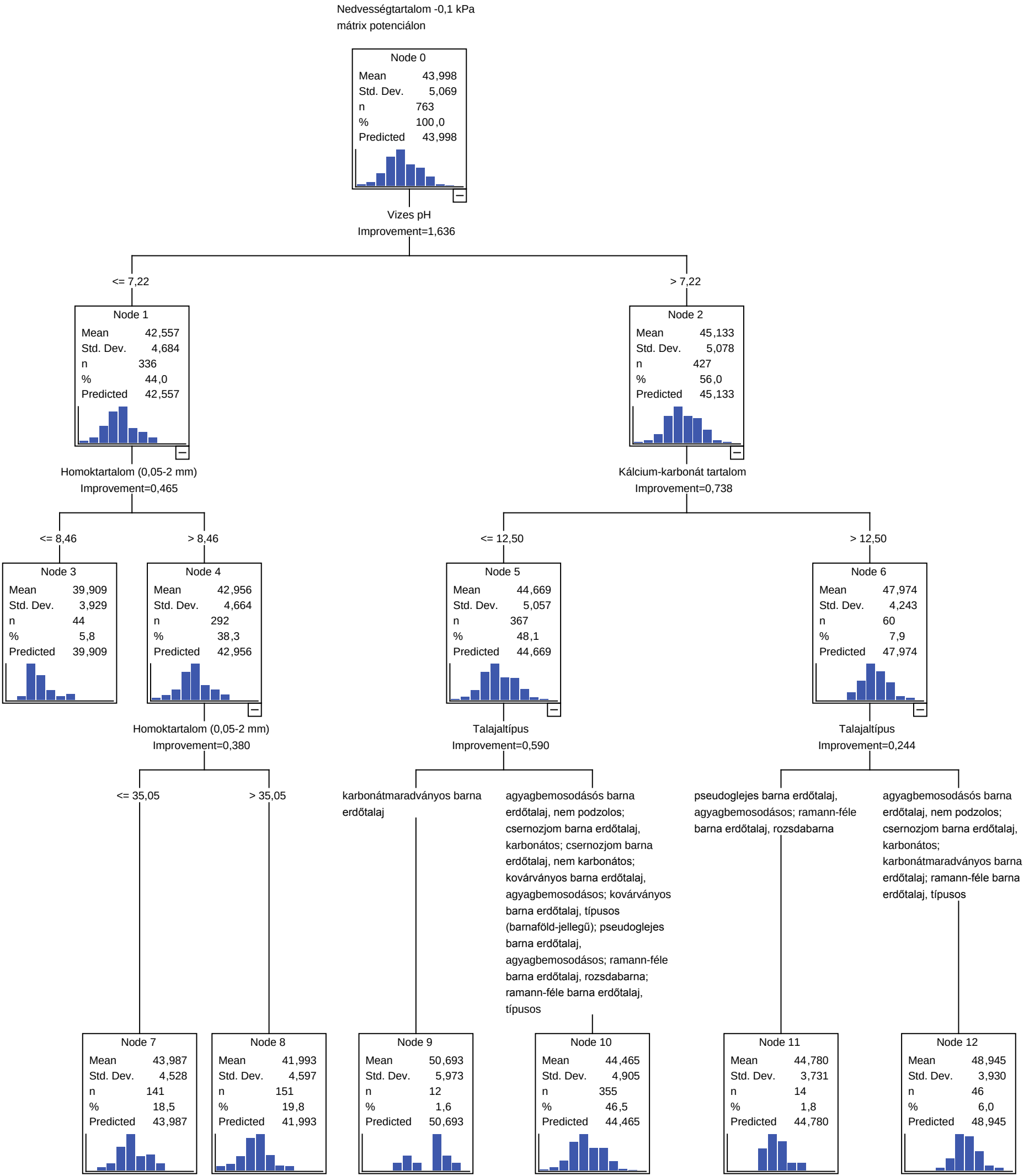
48. melléklet. Szikes főtípusú és szoloncsákos réti talajok -33 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



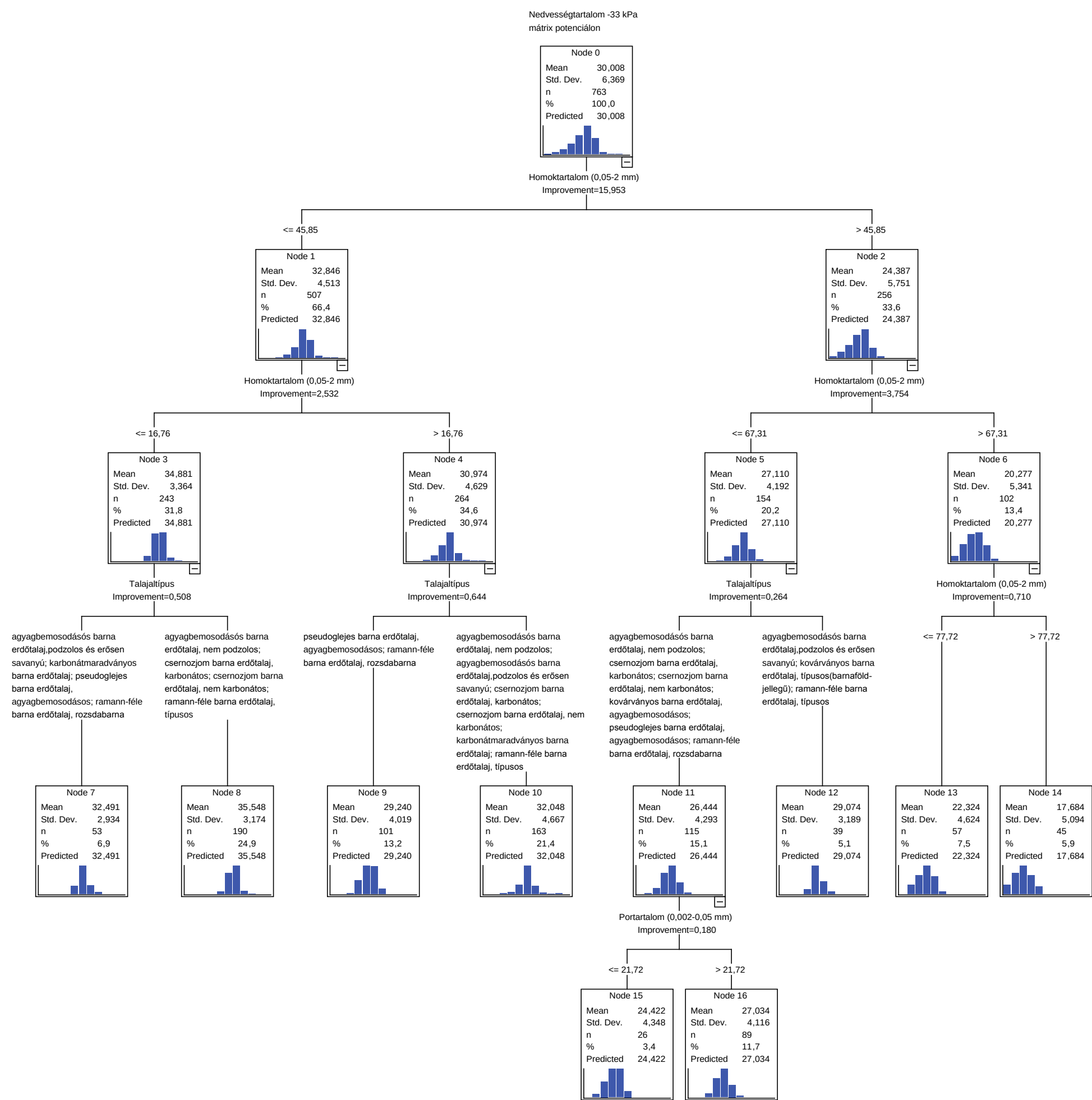
49. melléklet. Szikes főtípusú és szoloncsákos réti talajok -1500 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



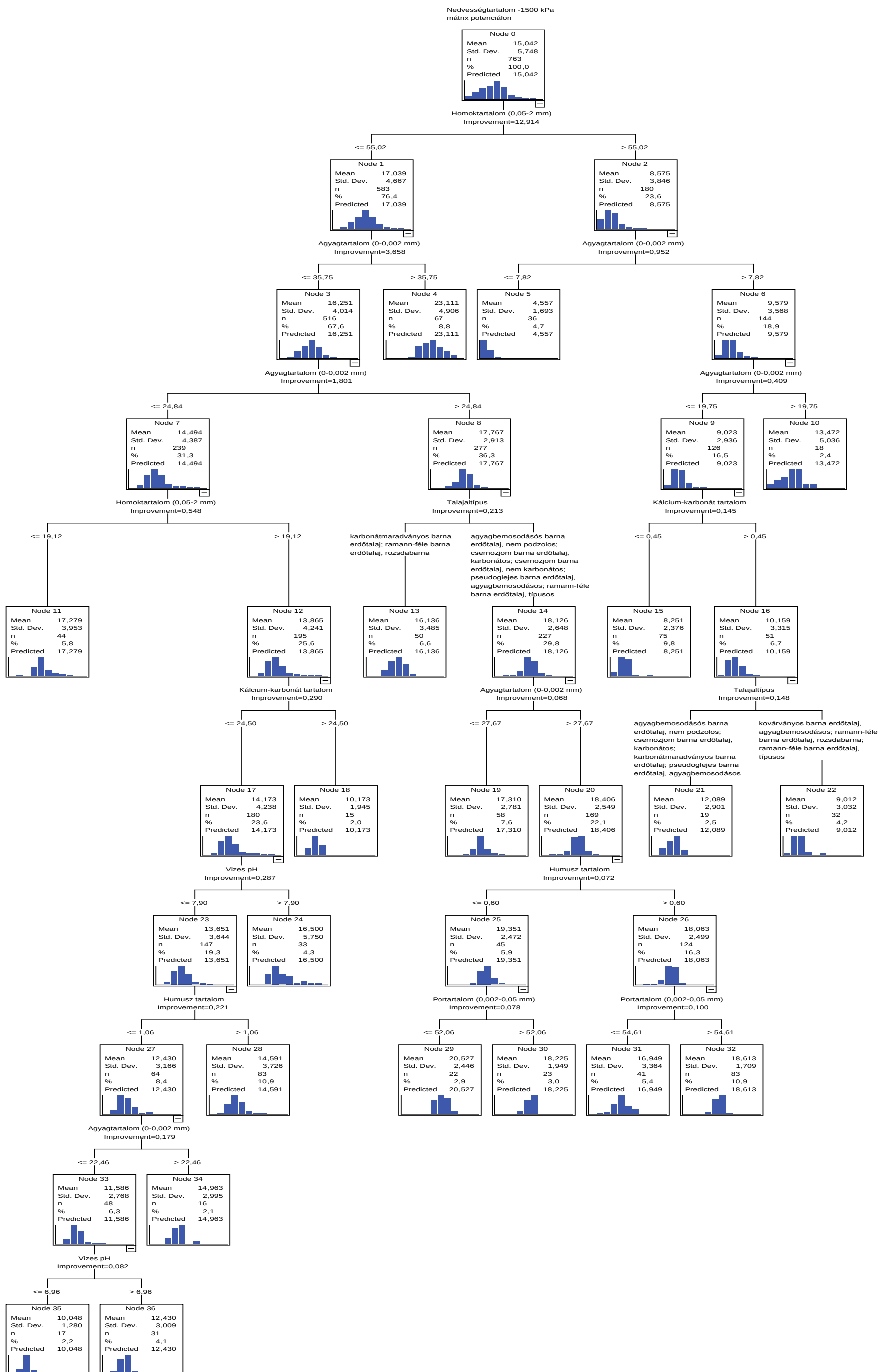
50. melléklet. Szikes főtípusú és szoloncsákos réti talajok hasznosítható vízkészletének becslése a CHAID (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-5. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



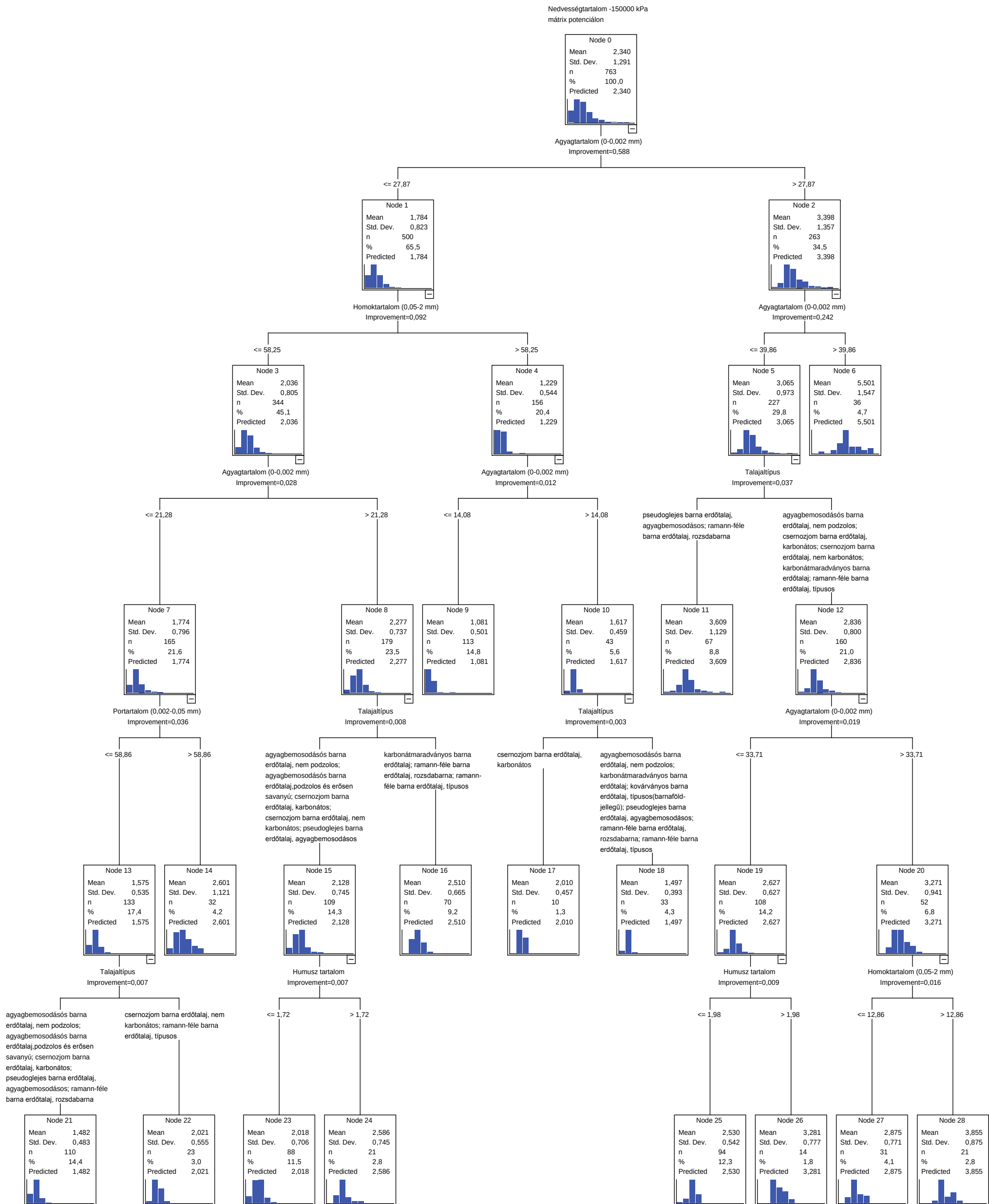
51. melléklet. Barna erdőtáajok -0,1 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel.
Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



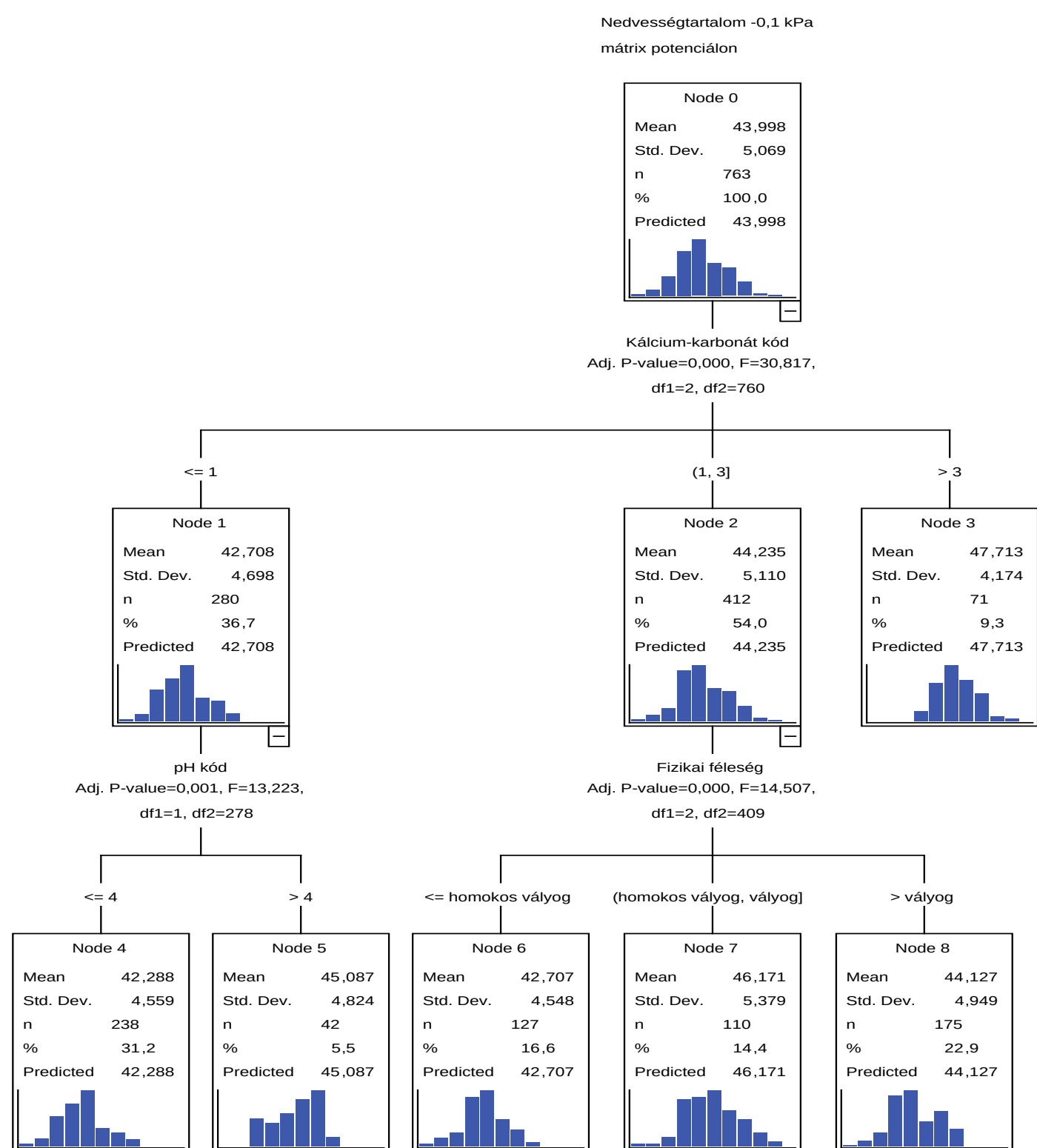
52. melléklet. Barna erdőtalajok -33 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



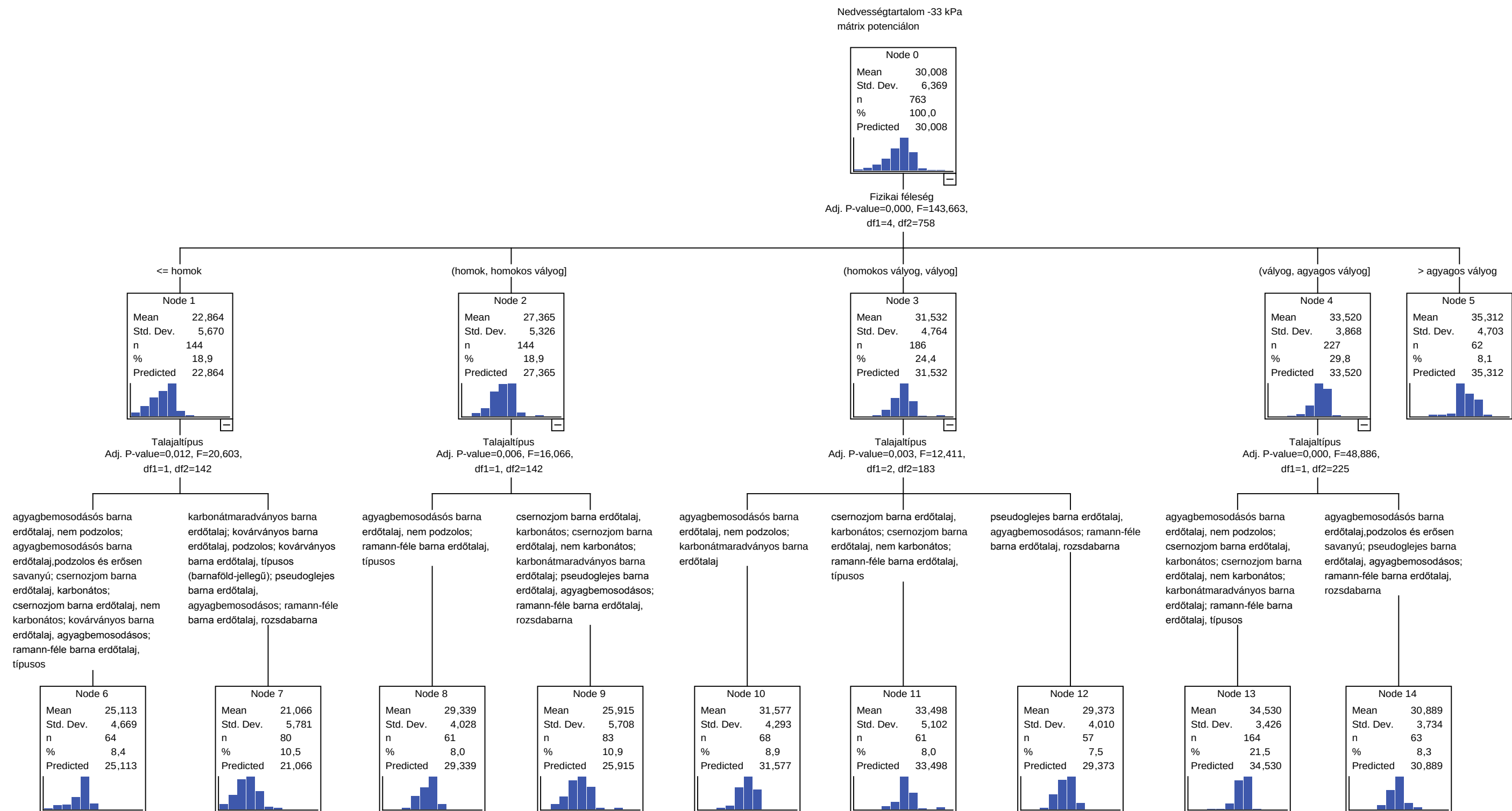
53. melléklet. Barna erdőtalajok -1500 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



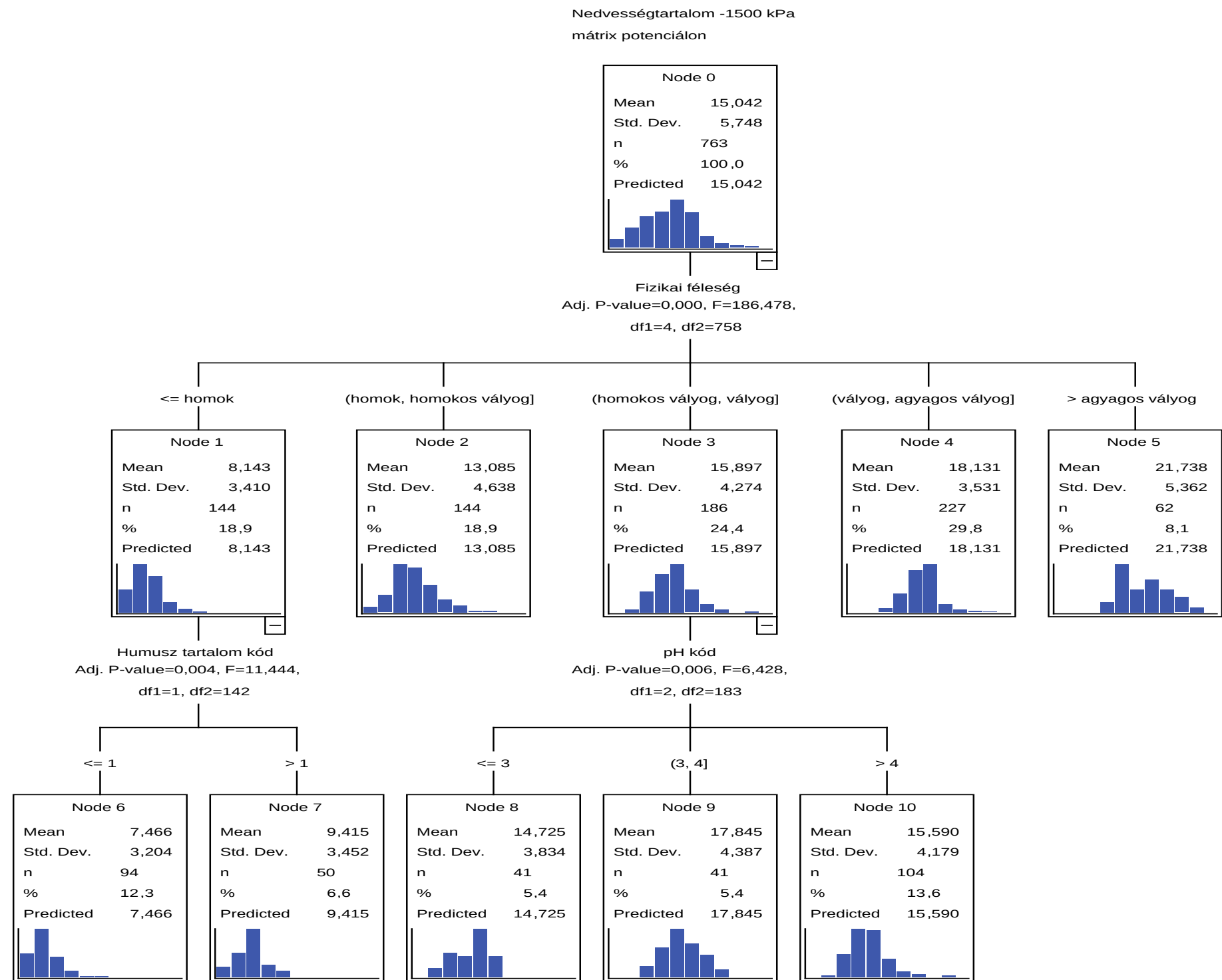
54. melléklet. Barna erdőtalajok -150000 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel.
Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



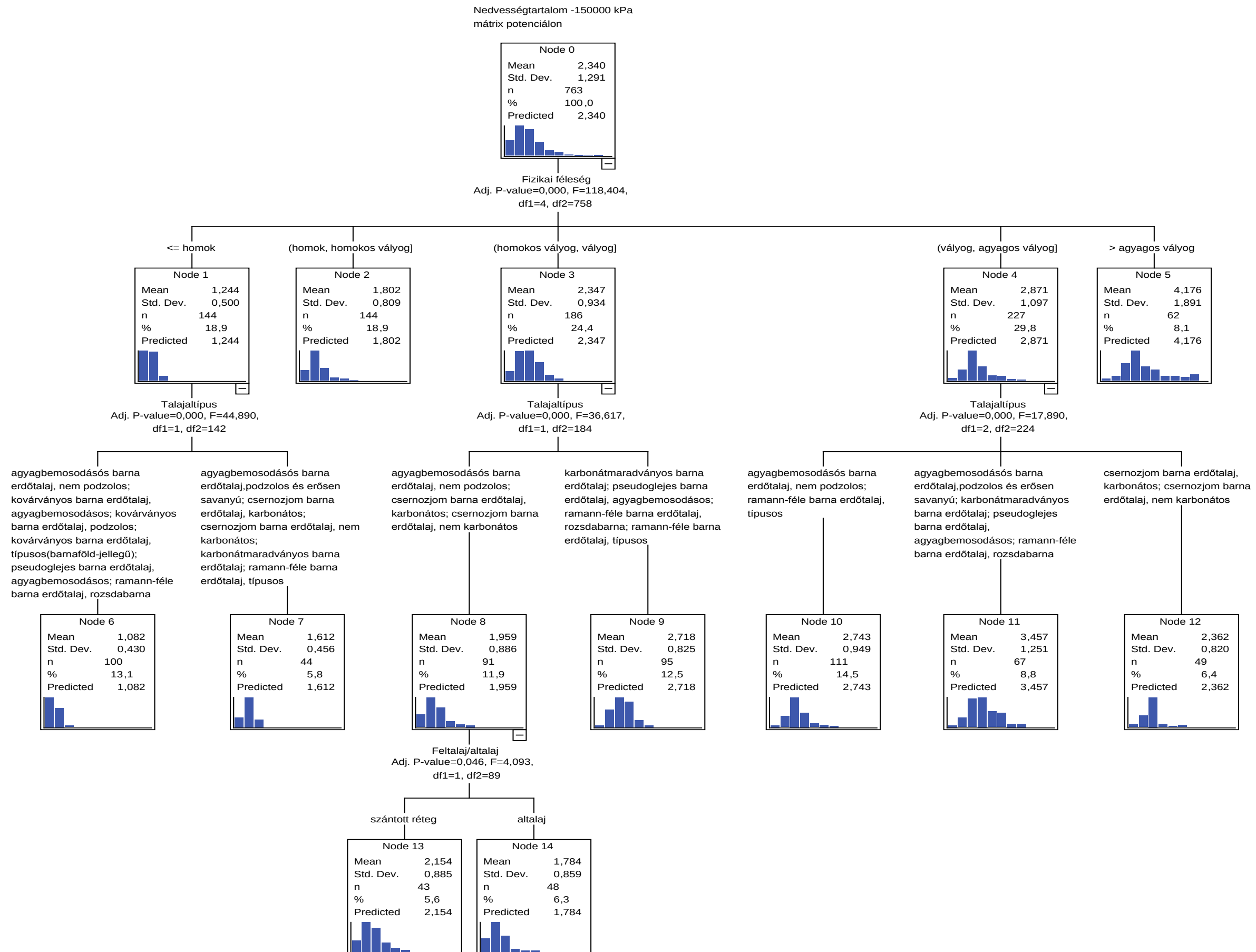
55. melléklet. Barna erdőtalajok -0,1 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID2 (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 6. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



56. melléklet. Barna erdőtalajok -33 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID2 (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 6. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



57. melléklet. Barna erdőtalajok -1500 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID2 (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 6. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



58. melléklet. Barna erdőtalajok -150000 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID2 (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 6. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

59. melléklet. Pedotranszfer függvények a barna erdőtalajok A és B szintjeire, a térfogattömeg figyelembe vételével.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 64,398 - (10,425 * \text{térfogattömeg}^2) - (0,001 * \text{homok}^2) - (0,689 * \ln(\text{humusz})) + (2,183 * \ln(\text{homok})) + (0,002 * \text{CaCO}_3^2) - (0,002 * \text{por} * \text{homok})$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = -11,652 + (2,412 * \ln(\text{agyag})) - (21,900 * \text{térfogattömeg}^2) + (61,808 * \text{térfogattömeg}) - (22,597 * \text{por}^{-1}) - (1,995 * \ln(\text{homok})) - (0,001 * \text{homok}^2)$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 36,430 - (0,002 * \text{homok}^2) - (13,256 * \text{térfogattömeg}^{-1}) + (0,299 * \text{humusz}^2) + (0,004 * \text{agyag}^2) - (21,689 * \text{pH}^{-1}) - (2,467 * \ln(\text{por}))$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 3,975 + (0,091 * \text{humusz}^2) - (7,200 * \text{pH}^{-1}) + (0,305 * \text{térfogattömeg}^2) - (0,001 * \text{agyag} * \text{por}) + (0,222 * \text{agyag}) - (1,961 * \ln(\text{agyag})) - (2,602 * \text{agyag}^{-1})$$

$$\text{DV} = 11,443 - (2,886 * \text{térfogattömeg}^2) + (52,698 * \text{pH}^{-1}) - (0,003 * \text{agyag}^2) + (0,064 * \text{CaCO}_3) + (2,190 * \ln(\text{agyag})) - (0,003 * \text{agyag} * \text{homok}) - (16,869 * \text{por}^{-1})$$

60. melléklet. Pedotranszfer függvények a barna erdőtalajok A és B szintjeire, térfogattömeg nélkül.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 50,770 + (0,114 * \text{CaCO}_3) + (0,065 * \text{pH}^2) - (0,268 * \text{homok}) + (4,839 * \ln(\text{homok})) - (2,365 * \ln(\text{agyag})) - (2,712 * \ln(\text{por}))$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 28,540 - (0,132 * \text{homok}) + (2,265 * \ln(\text{agyag})) - (25,128 * \text{por}^{-1})$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 12,193 + (0,349 * \text{agyag}) - (0,001 * \text{homok}^2) + (0,647 * \text{humusz}) - (1,437 * \ln(\text{agyag}))$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 4,320 + (0,085 * \text{humusz}^2) - (5,866 * \text{pH}^{-1}) - (0,001 * \text{agyag} * \text{por}) + (0,218 * \text{agyag}) - (1,885 * \ln(\text{agyag})) - (2,468 * \text{agyag}^{-1})$$

$$\text{DV} = 14,341 - (0,002 * \text{agyag}^2) + (46,405 * \text{pH}^{-1}) + (0,092 * \text{CaCO}_3) - (24,896 * \text{por}^{-1}) - (1,186 * \ln(\text{homok}))$$

61. melléklet. A barna erdőtalajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan tesztel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt átlagos négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	763	21,61
LR1_AB	763	21,95
CHAD2	763	22,44
CRT_kat	763	22,63

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

62. melléklet. A barna erdőtalajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok	
		1	2
CRT3	763	15,97	
LR1_AB	763	17,49	17,49
CRT_kat	763		20,19
CHAID2	763		20,29

63. melléklet. A barna erdőtalajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok	
		1	2
CRT3	763	10,83	
LR1_AB	763	13,11	
CRT_kat	763		15,88
CHAID2	763		16,18

64. melléklet. A barna erdőtalajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok	
		1	2
CRT3	763	0,57	
LR1_AB	763	0,69	
CHAID2	763		0,92
CRT_kat	763		0,93

65. melléklet. A barna erdőtalajok hozzáférhető vízkészletének közvetlen becslésére és közvetett számítására (a -33 és -1500 kPa-hoz tartozó becsült víztartó képességekből) kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becsló adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslo módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	763	18,34
LR1_AB	763	19,76
CRT_kat	763	19,86
CHAID2	763	20,12

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

66. melléklet. A barna erdőtalajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt átlagos négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslo módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
LR_AB	81	23,84
CRT3	81	26,01
CRT_kat	81	26,25
CHAID2	81	27,06

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

67. melléklet. A barna erdőtalajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslo módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
LR_AB	81	16,98
CRT3	81	19,12
CRT_kat	81	26,68
CHAID2	81	26,74

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

68. melléklet. A barna erdőtalajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
LR_AB	81	17,52
CRT_kat	81	20,10
CHAID2	81	20,39
CRT3	81	20,80

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

69. melléklet. A barna erdőtalajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

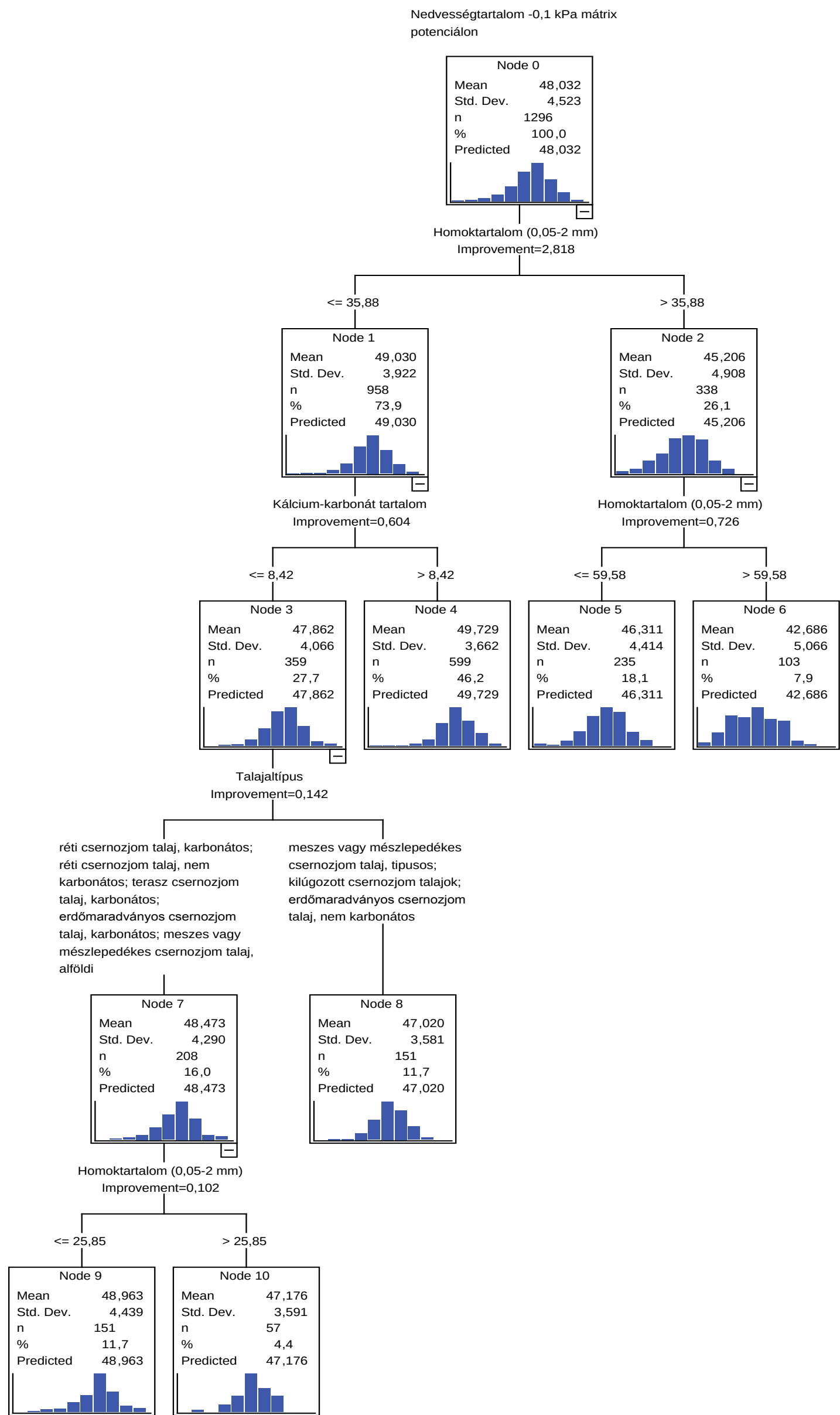
Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	81	0,66
LR_AB	81	0,83
CHAID2	81	0,95
CRT_kat	81	1,01

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

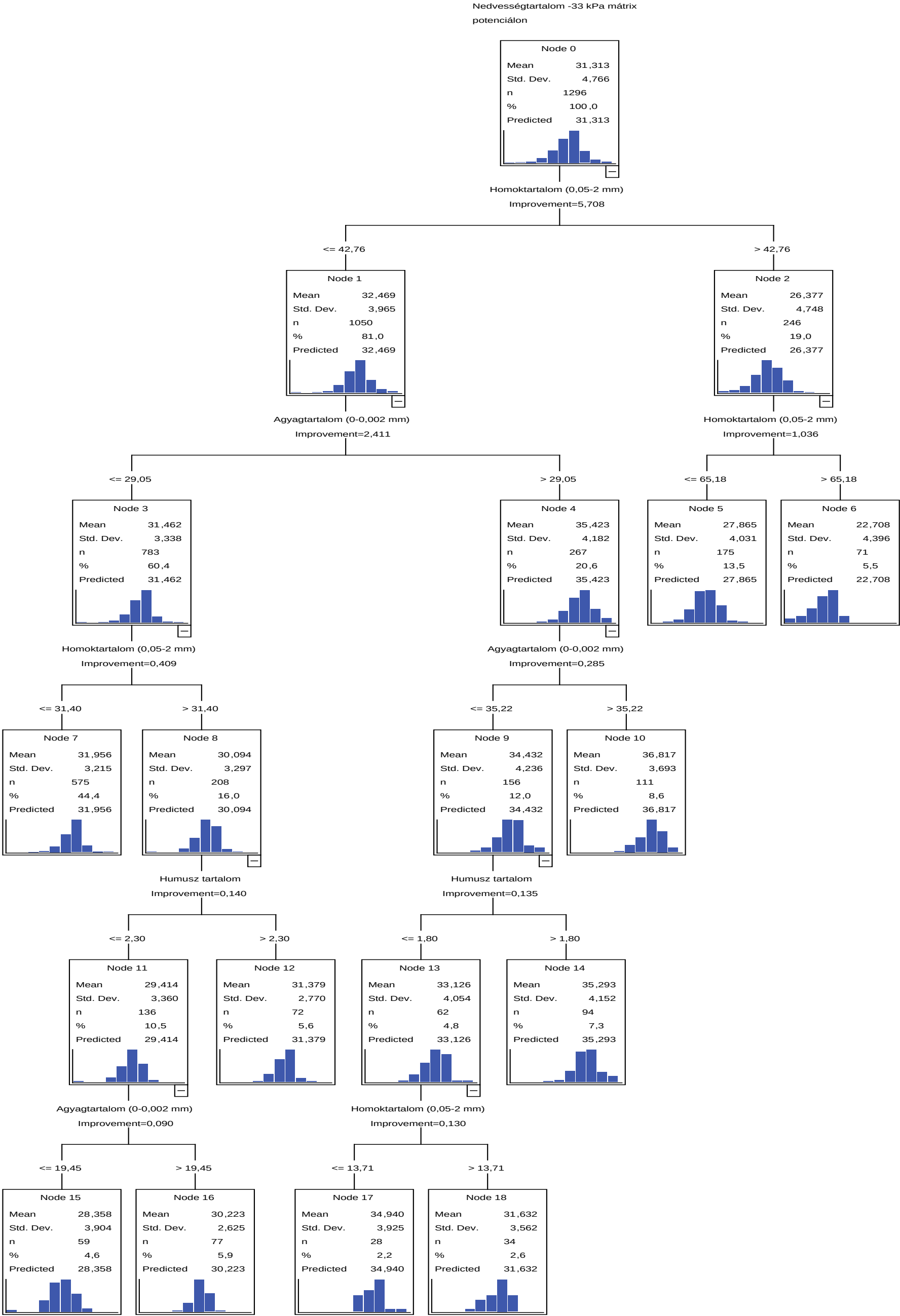
70. melléklet. A barna erdőtalajok hozzáférhető vízkészletének közvetlen becslésére és közvetett számítására (a -33 és -1500 kPa-hoz tartozó becsült víztartó képességekből) kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	81	21,13
LR_AB	81	23,12
CHAID2	81	25,76
CRT_kat	81	27,43

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.



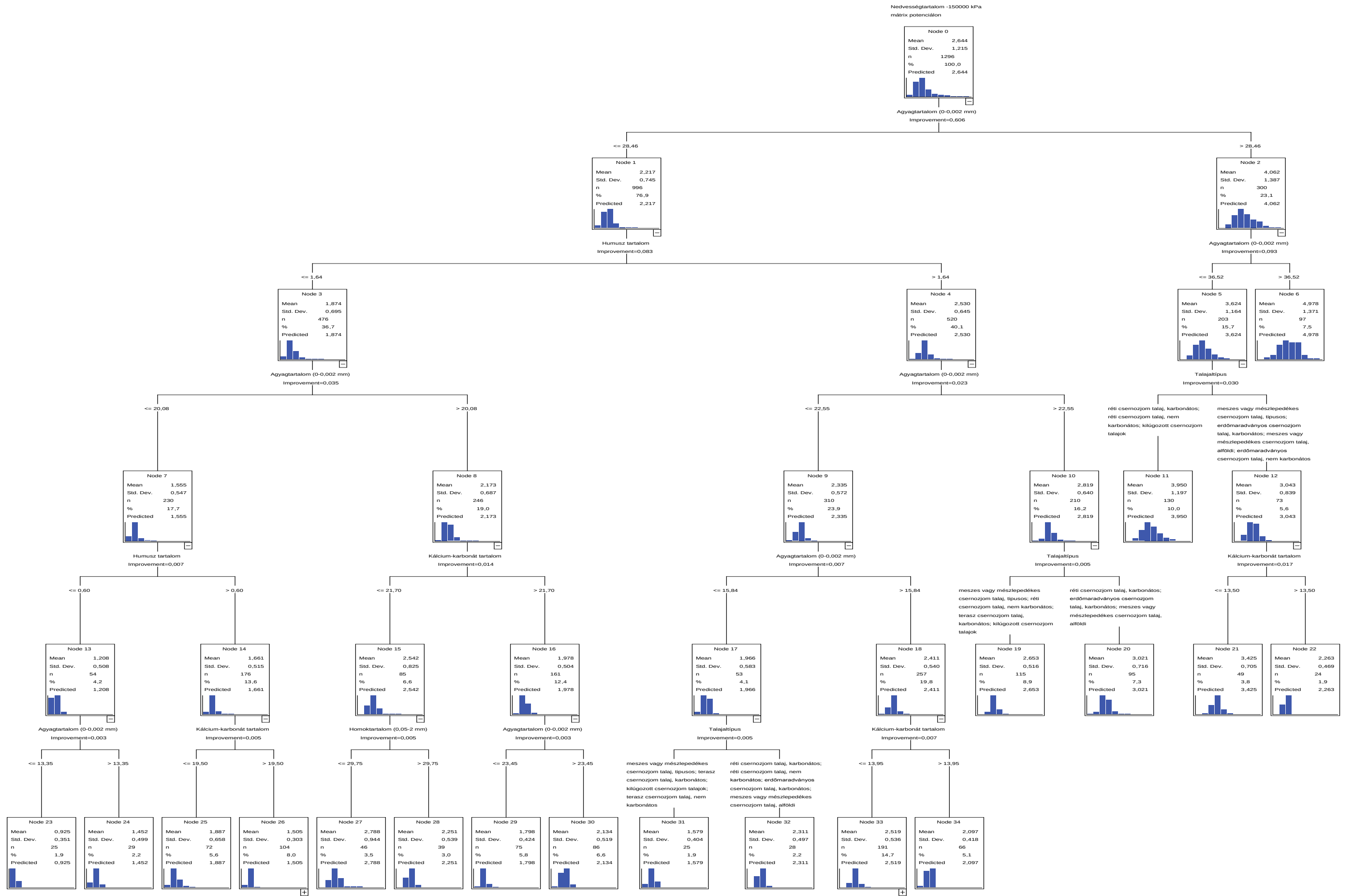
71. melléklet. Csernozjom talajok -0,1 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



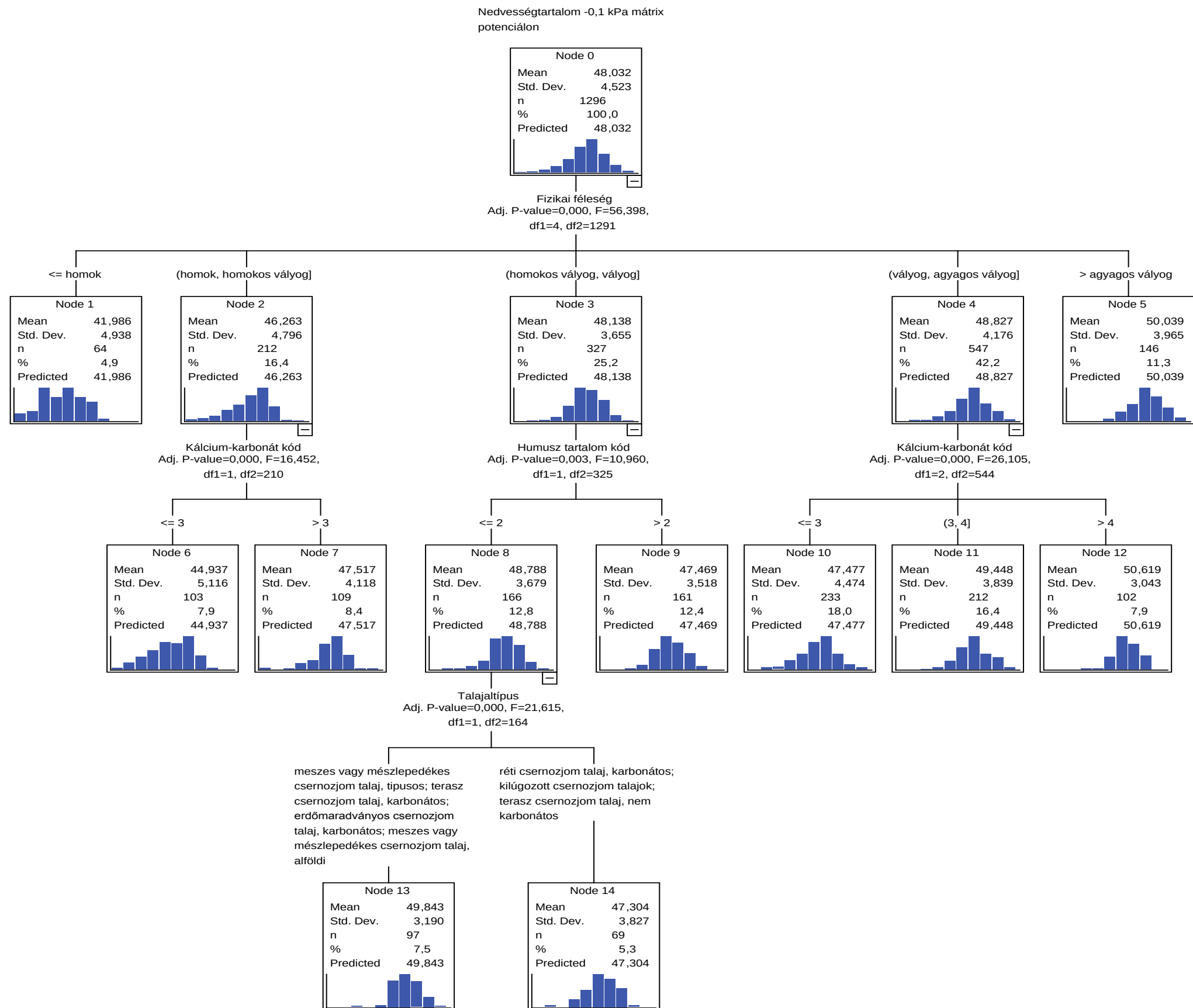
72. melléklet. Csernozjom talajok -33 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



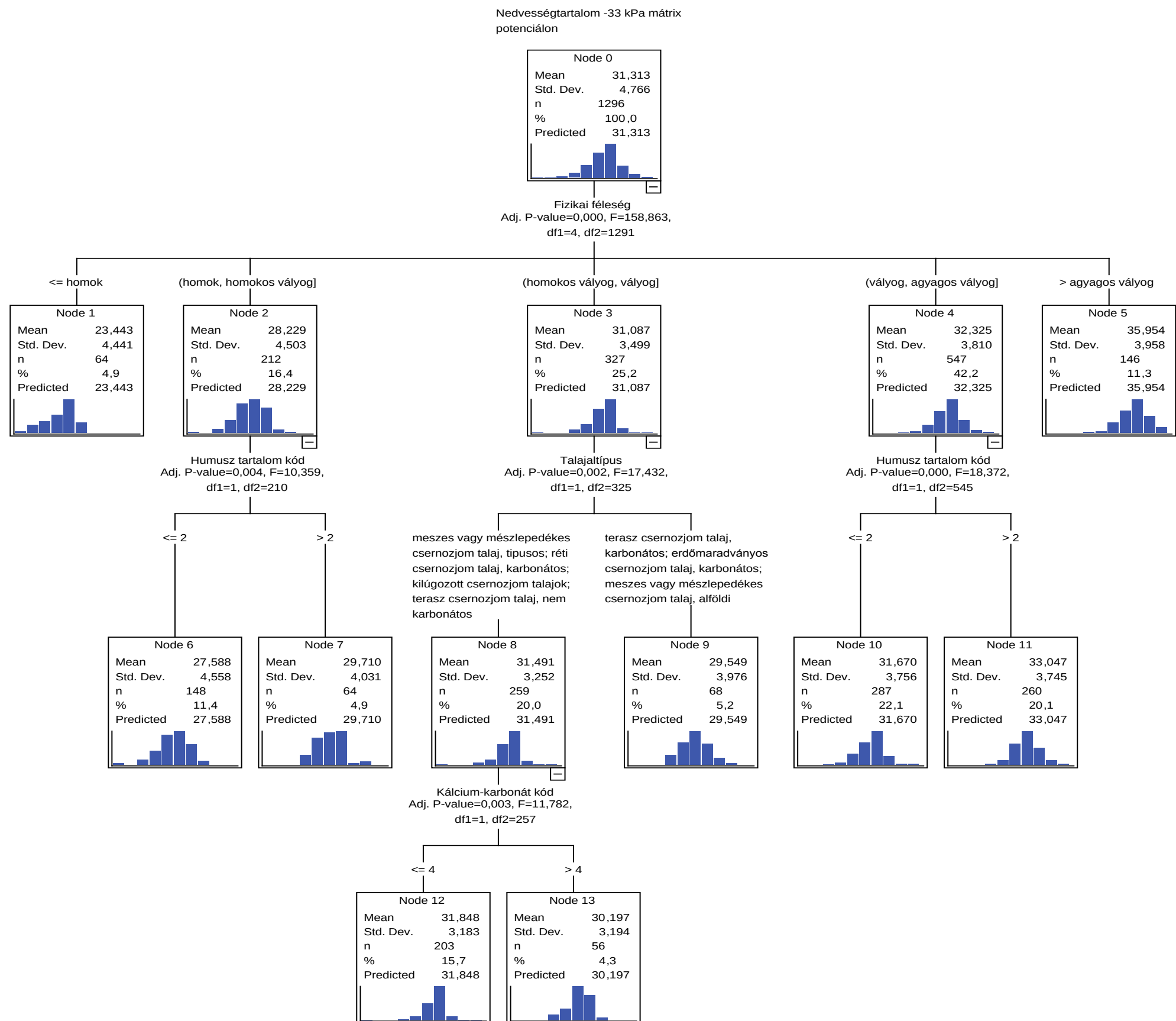
73. melléklet. Csernozjom talajok -1500 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



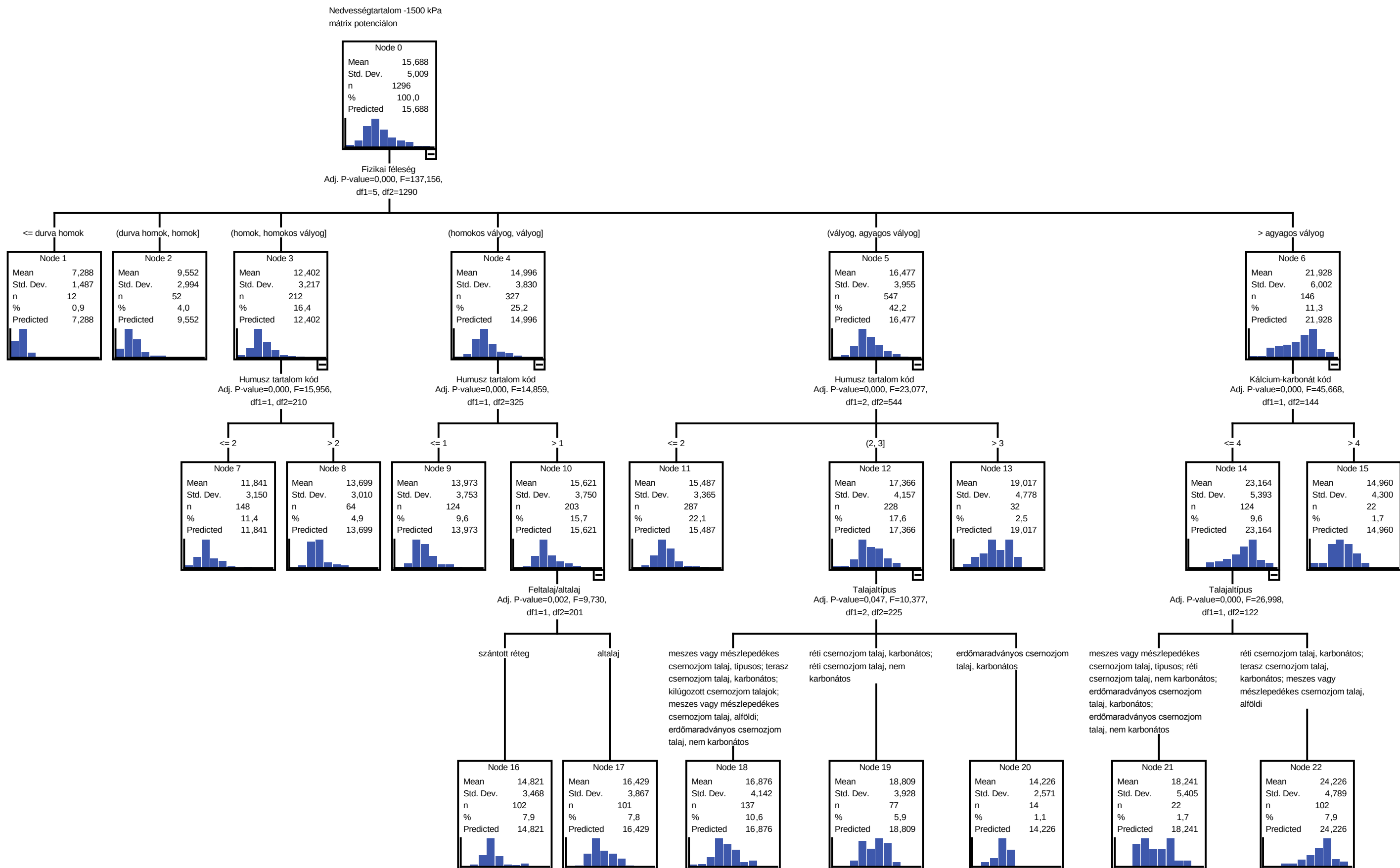
74. melléklet. Csernozjom talajok -150000 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel.
Az olvashatóbb megjelenítés érdekében a fa alsó 2 szintje nincs feltüntetve. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



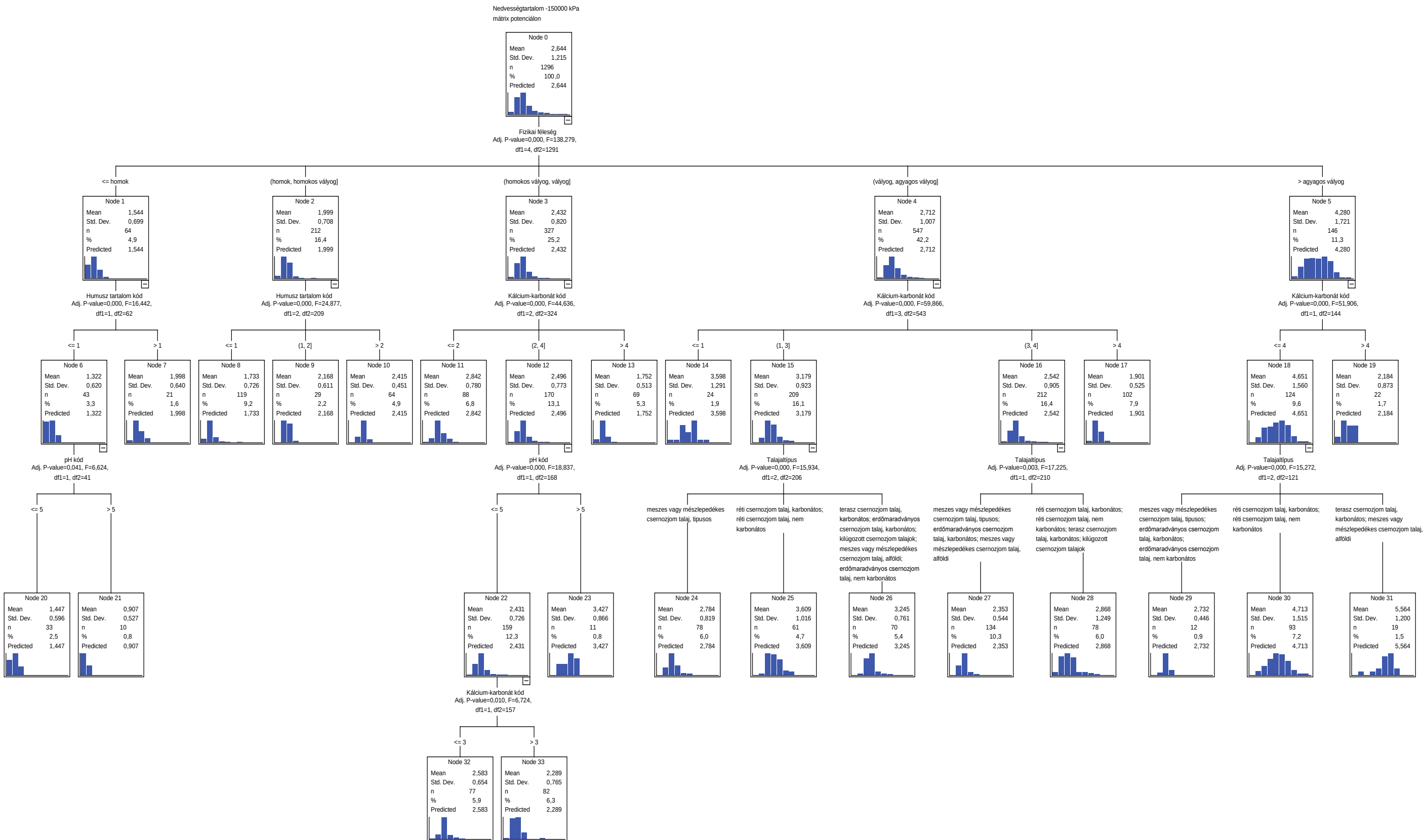
75. melléklet. Csernozjom talajok -0,1 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID2 (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 7. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



76. melléklet. Csernozjom talajok -33 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID2 (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 7. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



77. melléklet. Csernozjom talajok -1500 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID2 (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 7. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



78. melléklet. Csernozjom talajok -150000 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID2 (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 7. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

79. melléklet. Pedotranszfer függvények a csernozjom talajok A és B szintjeire, a térfogattömeg figyelembe vételével.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 63,711 - (10,889 * \text{térfogattömeg}^2) + (1,669 * \ln(\text{por})) - (0,384 * \text{humusz}) - (0,284 * \text{humusz}^{-1}) + (1,355 * \text{agyag}^{-1})$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 28,011 + (0,001 * \text{por} * \text{homok}) + (0,128 * \text{humusz}^2) + (0,201 * \text{agyag}) - (0,124 * \text{homok})$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 11,431 + (0,374 * \text{agyag}) + (1,695 * \ln(\text{humusz})) - (4,004 * \ln(\text{homok})) + (0,005 * \text{por} * \text{homok}) + (62,680 * \text{por}^{-1})$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 2,149 + (0,002 * \text{agyag}^2) - (0,001 * \text{CaCO}_3^2) + (0,154 * \text{humusz}) - (10,486 * \text{pH}^{-1}) + (0,153 * \text{térfogattömeg}^2)$$

$$\text{DV} = -43,396 - (0,002 * \text{agyag}^2) - (0,001 * \text{homok}^2) - (4,393 * \text{homok}^{-1}) - (1,067 * \ln(\text{humusz})) - (32,829 * \text{térfogattömeg}^2) + (90,391 * \text{térfogattömeg})$$

80. melléklet. Pedotranszfer függvények a csernozjom talajok A és B szintjeire, térfogattömeg nélkül.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = -569,149 - (0,001 * \text{homok}^2) + (0,185 * \text{CaCO}_3) - (0,003 * \text{CaCO}_3^2) + (3,450 * \text{agyag}^{-1}) - (4,215 * \text{pH}^2) + (88,845 * \text{pH}) + (1408,346 * \text{pH}^{-1})$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 28,011 + (0,001 * \text{por} * \text{homok}) + (0,128 * \text{humusz}^2) + (0,201 * \text{agyag}) - (0,124 * \text{homok})$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 11,431 + (0,374 * \text{agyag}) + (1,695 * \ln(\text{humusz})) - (4,004 * \ln(\text{homok})) + (0,005 * \text{por} * \text{homok}) + (62,680 * \text{por}^{-1})$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = 2,485 + (0,002 * \text{agyag}^2) - (0,001 * \text{CaCO}_3^2) + (0,148 * \text{humusz}) - (10,409 * \text{pH}^{-1})$$

$$\text{DV} = 18,689 - (0,002 * \text{agyag}^2) - (0,001 * \text{homok}^2) - (4,304 * \text{homok}^{-1}) - (1,015 * \ln(\text{humusz}))$$

81. melléklet. A csernozjom talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt átlagos négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
LR1_AB	1296	15,91
CRT_kat	1296	16,02
CRT3	1296	16,05
CHAID2	1296	16,17

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

82. melléklet. A csernozjom talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok	
		1	2
CRT3	1296	12,35	
LR1_AB	1296	12,53	
CRT_kat	1296		14,60
CHAID2	1296		14,60

83. melléklet. A csernozjom talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
LR1_AB	1296	12,24
CRT3	1296	12,25
CRT_kat	1296	13,12
CHAID2	1296	13,74

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

84. melléklet. A csernozjom talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok	
		1	2
CRT3	1296	0,52	
LR1_AB	1296	0,54	
CRT_kat	1296	0,63	0,63
CHAID2	1296		0,69

85. melléklet. A csernozjom talajok hozzáférhető vízkészletének közvetlen becslésére és közvetett számítására (a -33 és -1500 kPa-hoz tartozó becsült víztartó képességekből) kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becsló adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslo módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	1296	15,55
LR1_AB	1296	16,07
CRT_kat	1296	16,32
CHAID2	1296	16,38

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

86. melléklet. A csernozjom talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt átlagos négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslo módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT_kat	146	15,59
CHAID2	146	15,64
LR1_AB	146	15,72
CRT3	146	16,11

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

87. melléklet. A csernozjom talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslo módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CHAID2	146	10,21
CRT_kat	146	10,69
LR1_AB	146	11,30
CRT3	146	12,01

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

88. melléklet. A csernozjom talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
LR1_AB	146	11,63
CHAID2	146	12,53
CRT_kat	146	13,60
CRT3	146	13,81

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

89. melléklet. A csernozjom talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

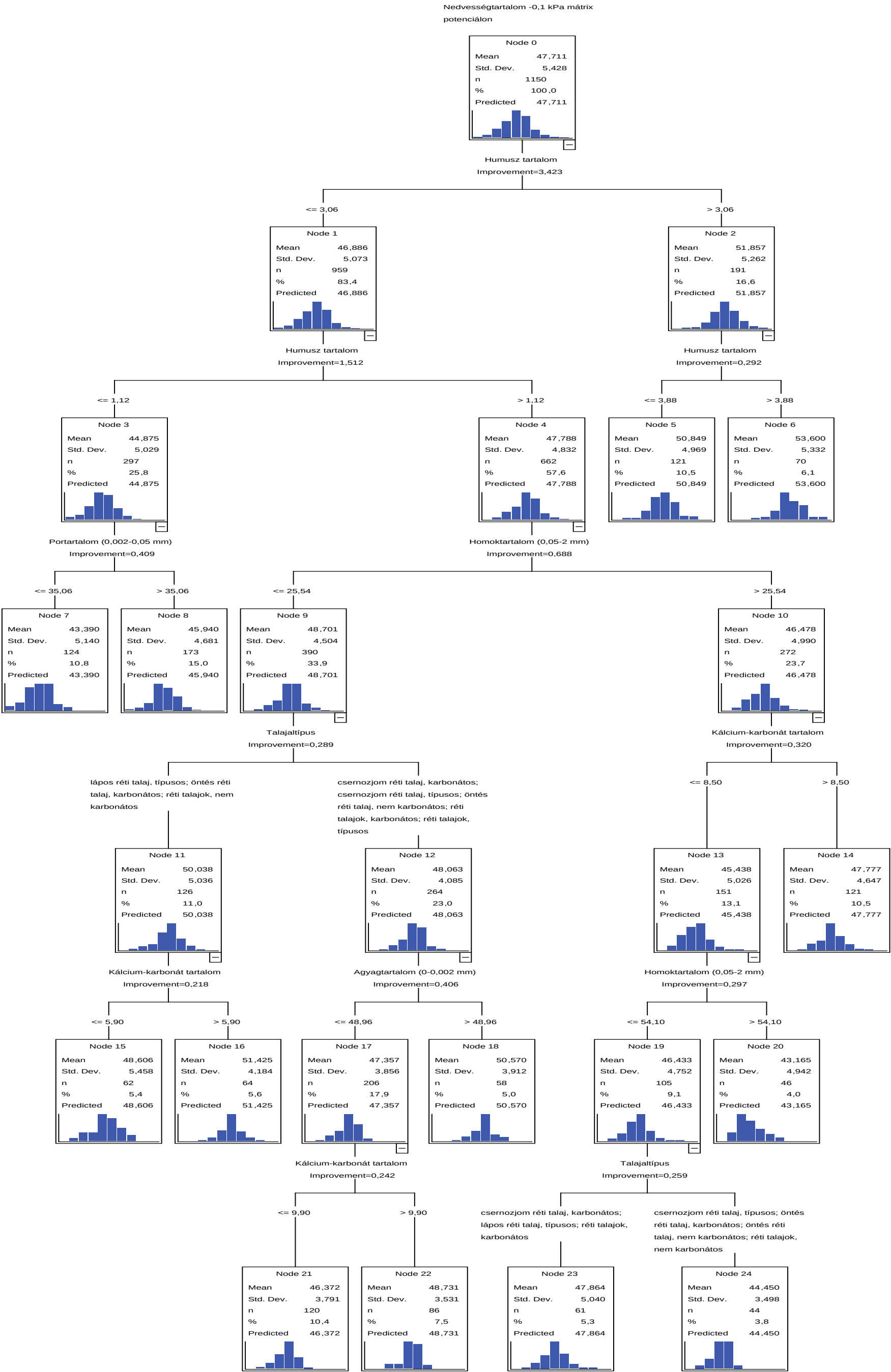
Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	146	0,58
CHAID2	146	0,61
LR1_AB	146	0,63
CRT_kat	146	0,74

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

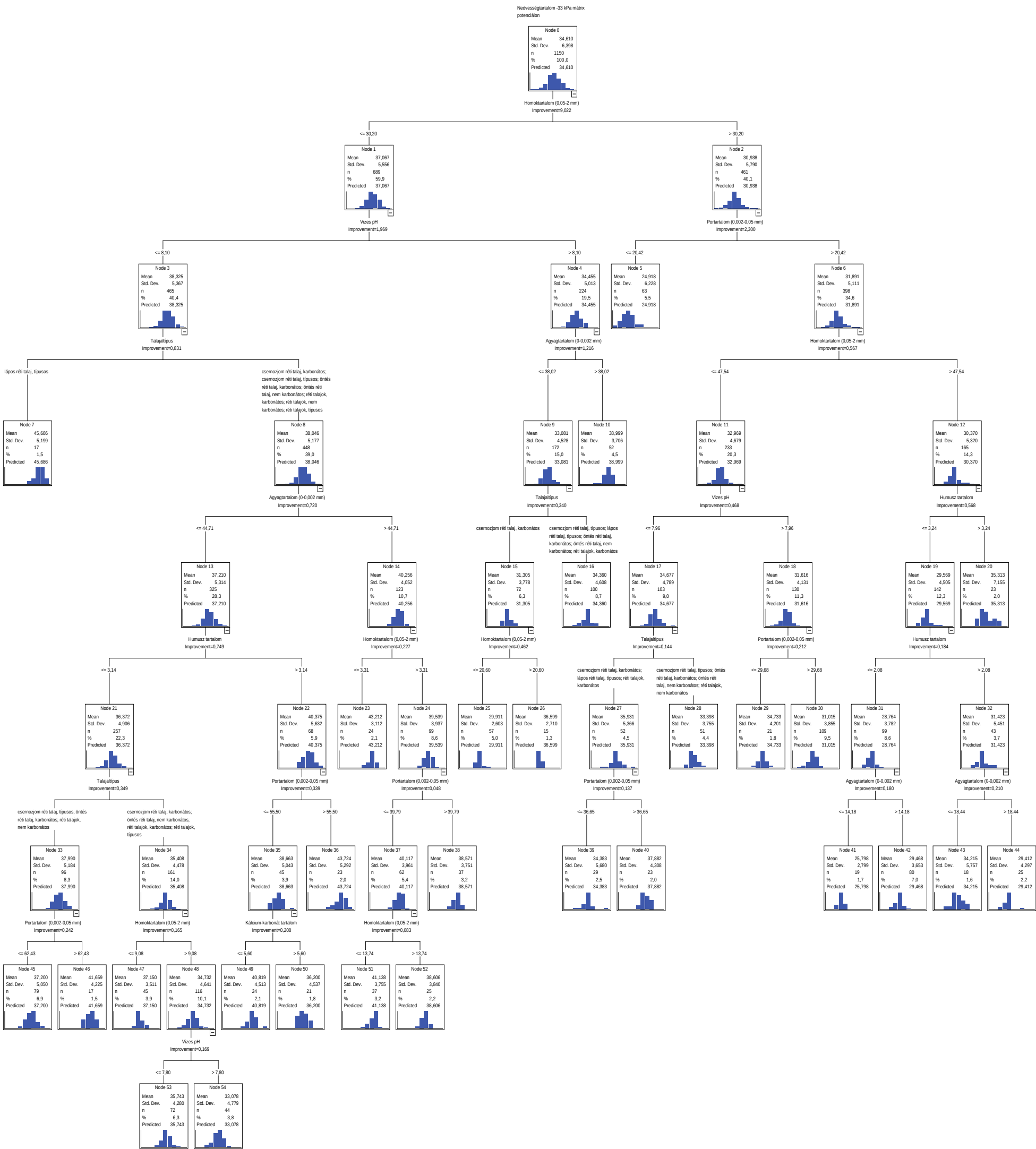
90. melléklet. A csernozjom talajok hozzáférhető vízkészletének közvetlen becslésére és közvetett számítására (a -33 és -1500 kPa-hoz tartozó becsült víztartó képességekből) kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT_kat	146	14,94
CHAID2	146	15,30
LR1_AB	146	16,18
CRT3	146	16,18

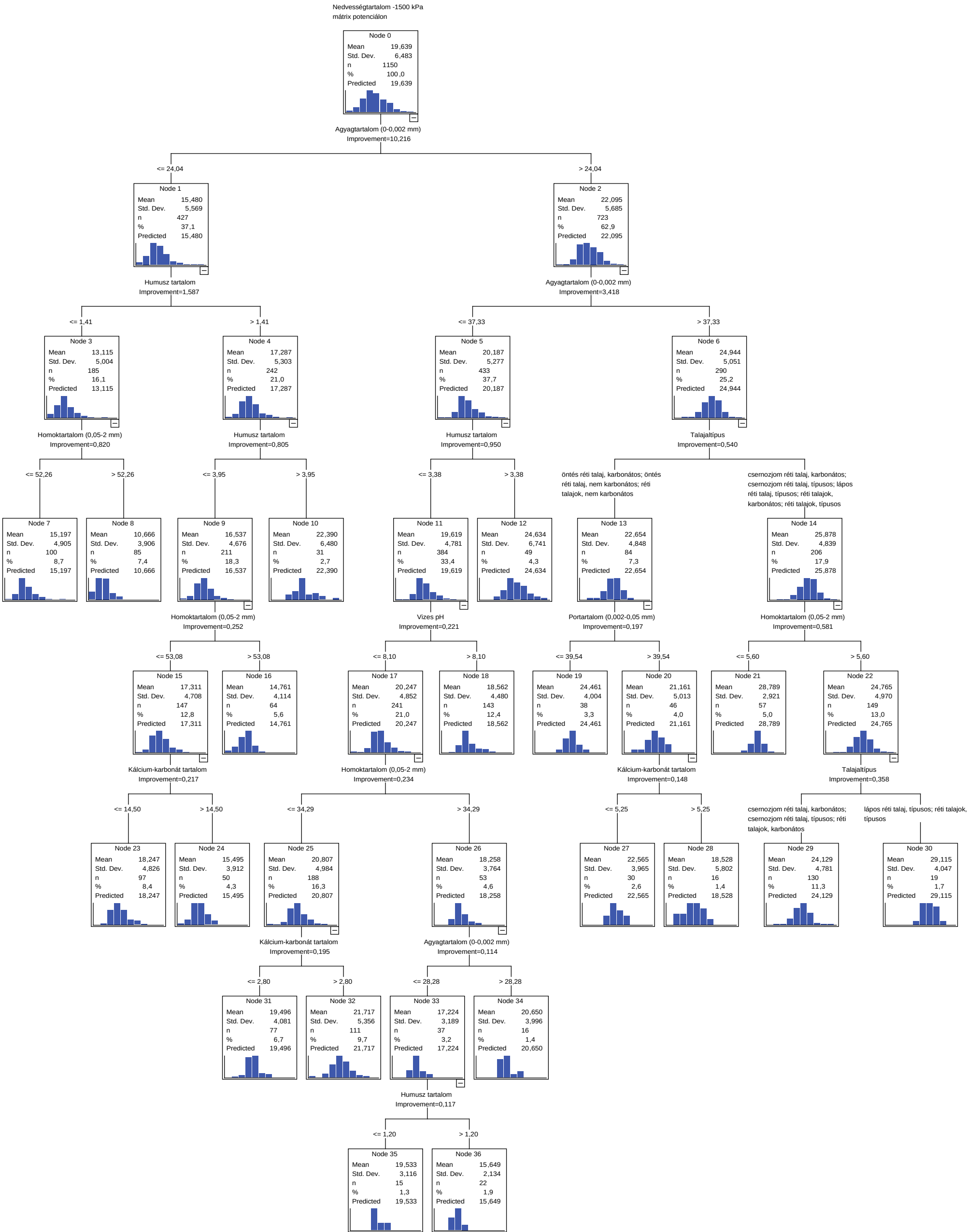
*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.



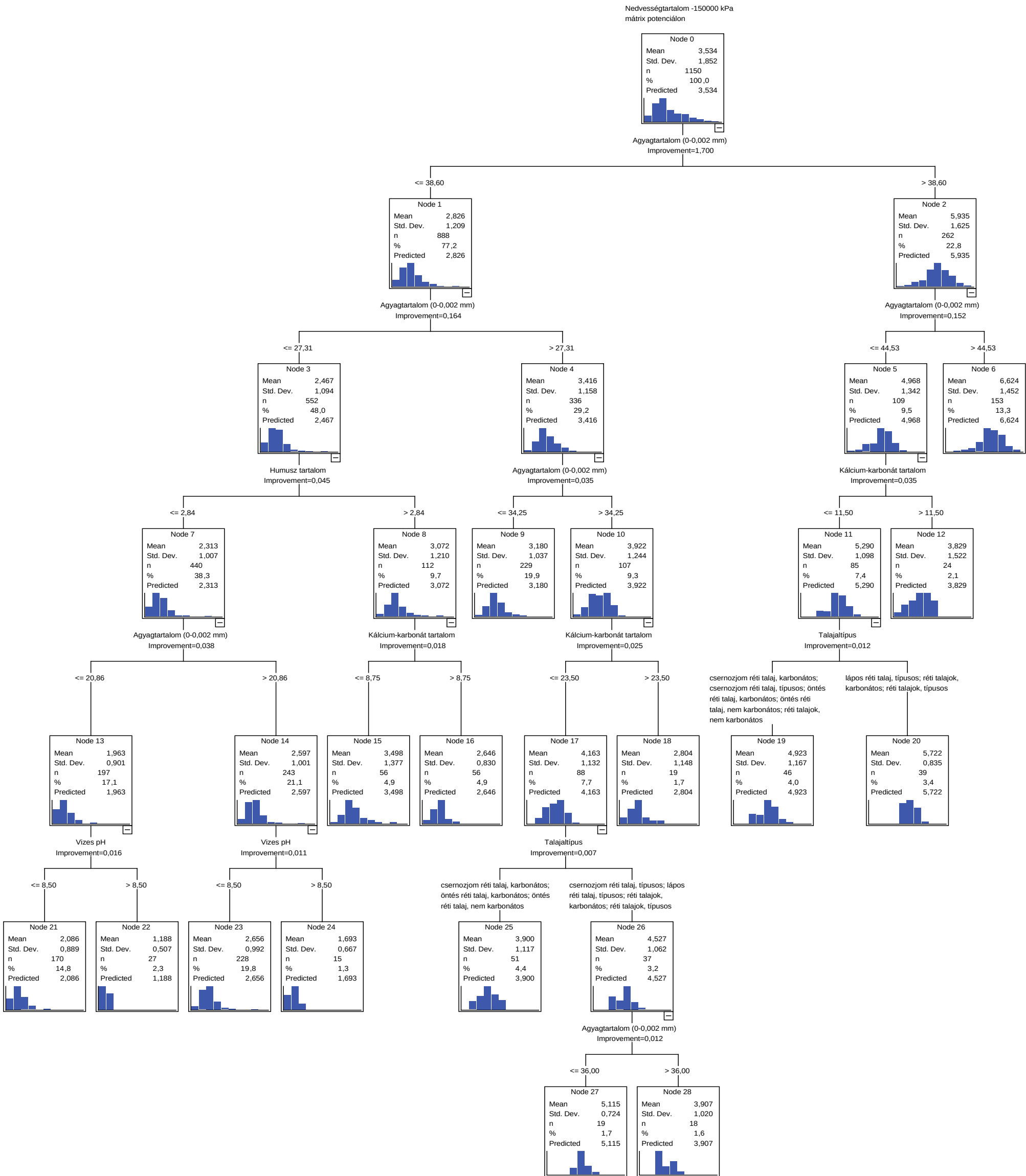
91. melléklet. Réti talajok -0,1 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



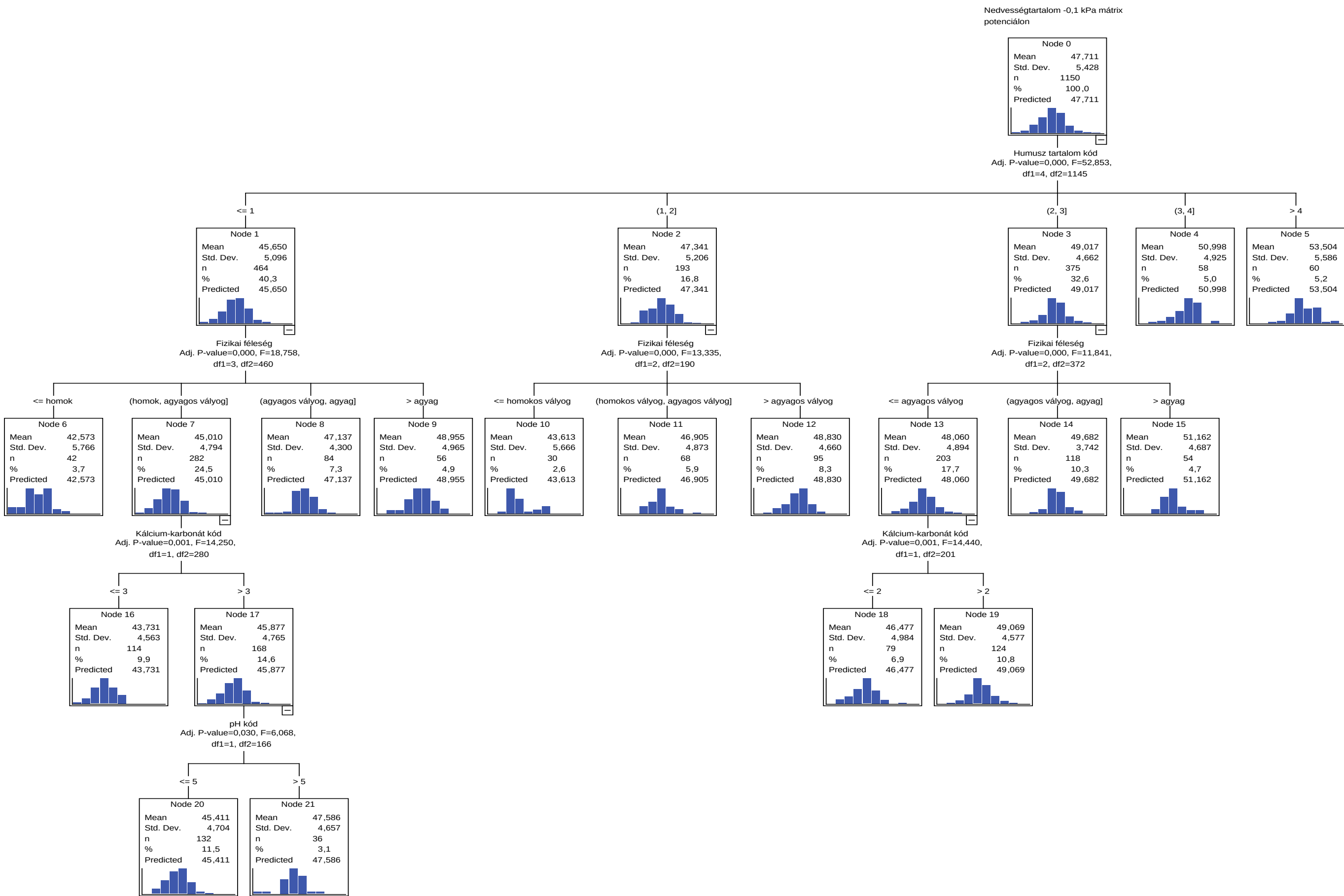
92. melléklet. Réti talajok -33 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



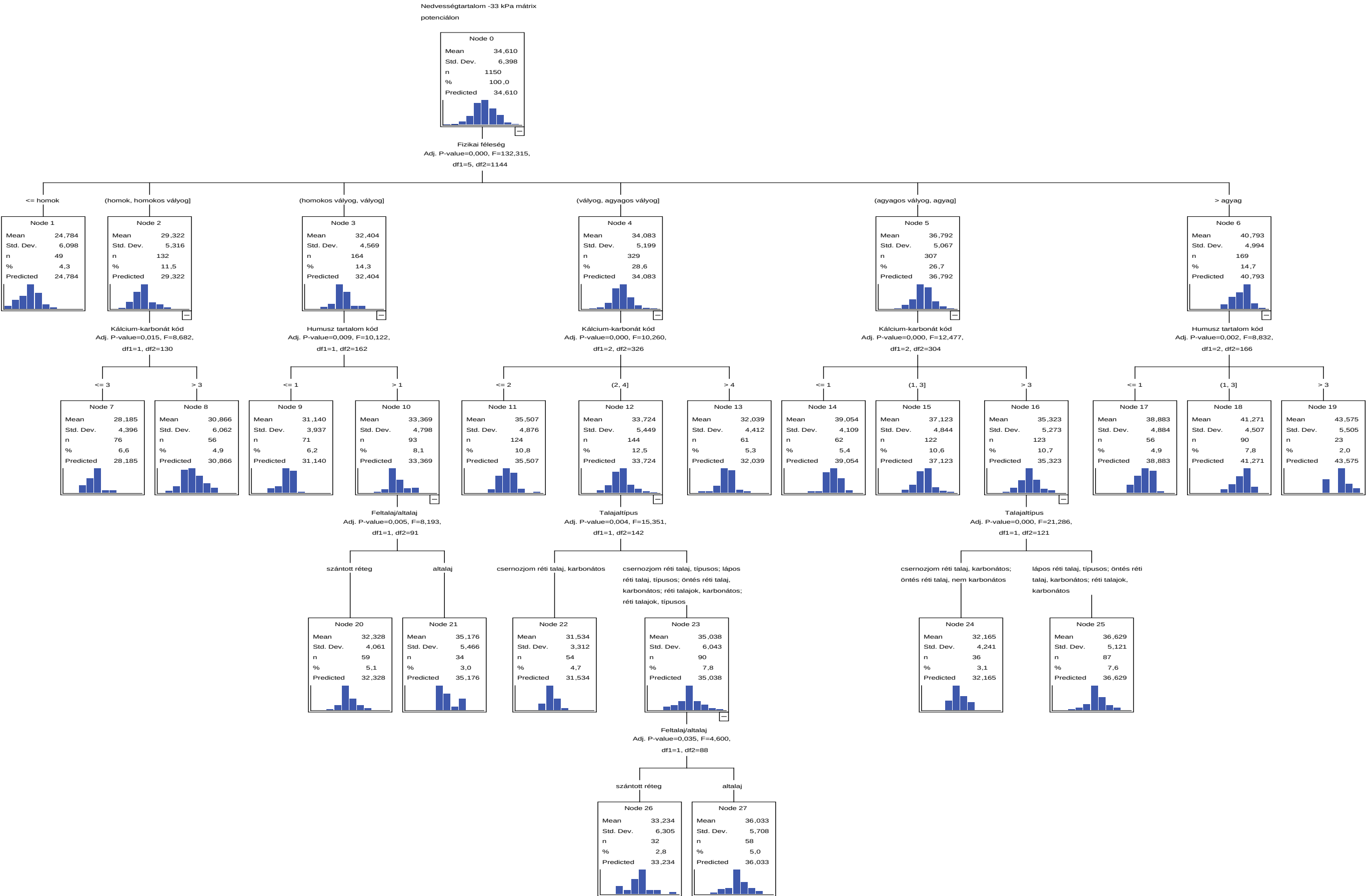
93. melléklet. Réti talajok -1500 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



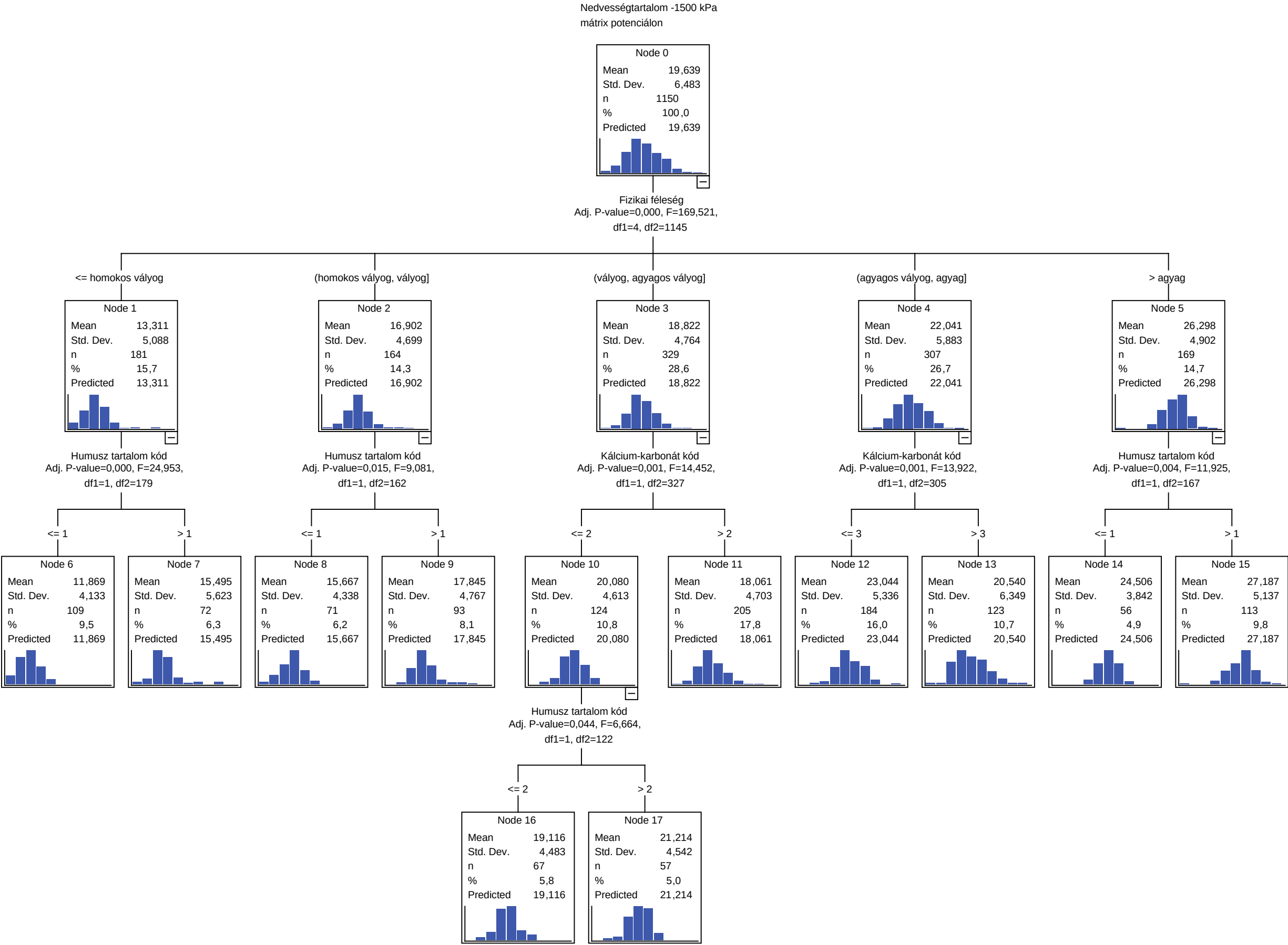
94. melléklet. Réti talajok -150000 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CRT3 (folytonos értékek alapján számolt) modellel. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



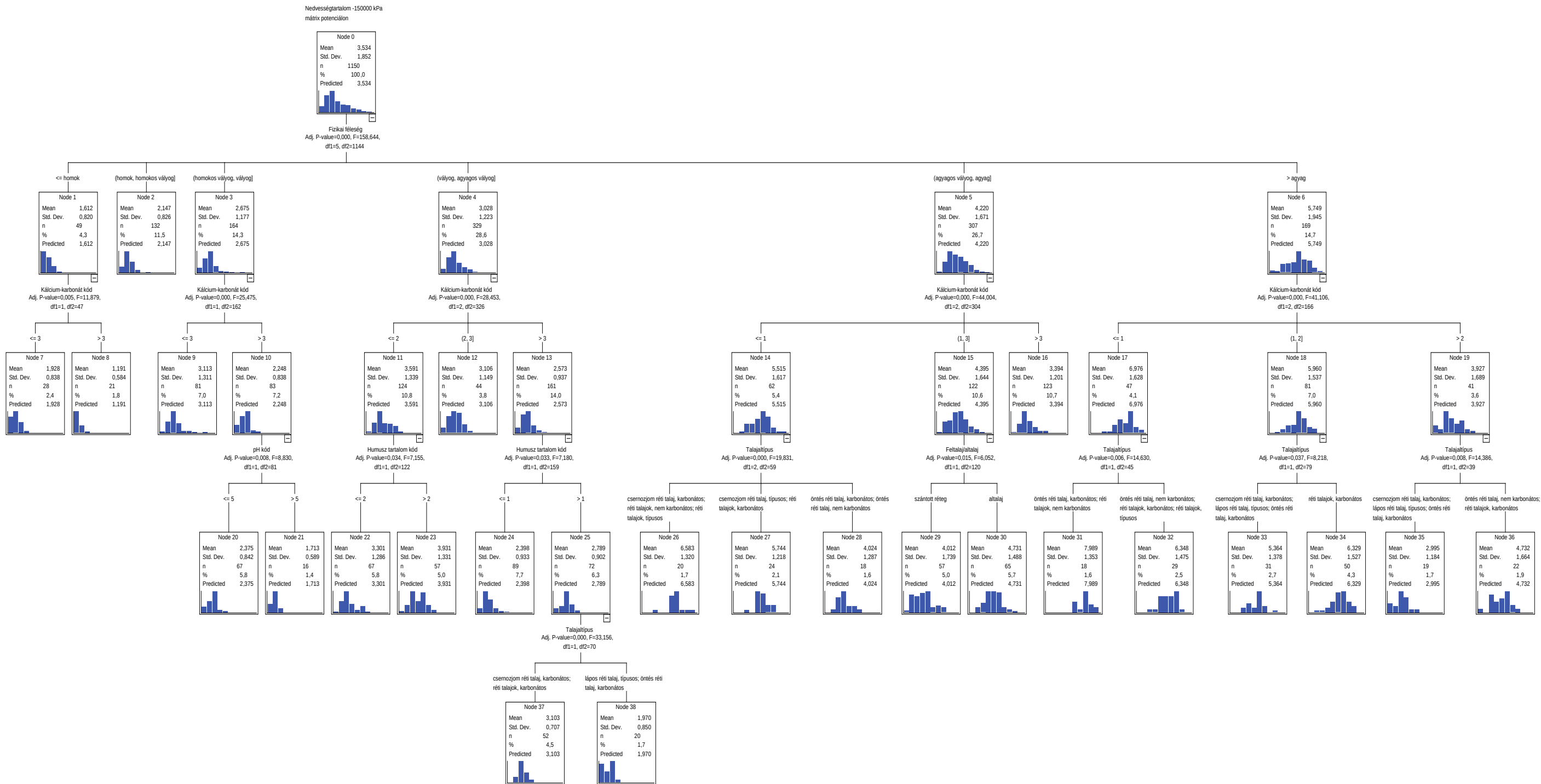
95. melléklet. Réti talajok -0,1 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 8. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



96. melléklet. Réti talajok -33 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 8. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



97. melléklet. Réti talajok -1500 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 8. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.



98. melléklet. Réti talajok -150000 kPa mátrix potenciálhoz tartozó nedvesség tartalmának becslése a CHAID (kategória értékek alapján) modellel. A talajtulajdonságok kódjainak jelentését az 1-3. és 8. mellékletek mutatják. Az ábrán szereplő statisztikai fogalmak jelentését lásd a 10. mellékletben.

99. melléklet. Pedotranszfer függvények a réti talajok A és B szintjeire, a térfogattömeg figyelembe vételével.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 92,236 - (31,101 * \text{térfogattömeg}) - (0,015 * \text{CaCO}_3) + (6,424 * \text{por}^{-1})$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = -35,919 - (0,314 * \text{homok}) + (107,363 * \text{térfogattömeg}^{-1}) - (0,001 * \text{por}^2) - (0,080 * \text{pH}^2) + (57,543 * \ln(\text{térfogattömeg})) + (12,563 * \text{por}^{-1}) - (0,005 * \text{agyag} * \text{por}) - (1,830 * \ln(\text{homok})) + (0,003 * \text{agyag} * \text{homok}) - (0,031 * \text{CaCO}_3)$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = -10,214 + (6,926 * \ln(\text{agyag})) + (0,946 * \text{humusz}) + (11,098 * \text{térfogattömeg}^{-1}) - (1,025 * \ln(\text{homok})) + (8,271 * \text{por}^{-1})$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = -7,677 + (0,001 * \text{agyag}^2) - (0,056 * \text{CaCO}_3) + (0,044 * \text{humusz}^2) + (0,001 * \text{CaCO}_3^2) + (1,889 * \text{por}^{-1}) - (0,170 * \text{pH}^2) - (0,207 * \ln(\text{humusz})) + (2,639 * \text{pH})$$

$$\text{DV} = 7,860 + (16,782 * \text{térfogattömeg}^{-1}) - (0,200 * \text{agyag}) - (0,821 * \text{humusz}) - (0,091 * \text{pH}^2) + (1,774 * \ln(\text{por})) + (0,002 * \text{agyag}^2)$$

100. melléklet. Pedotranszfer függvények a réti talajok A és B szintjeire, térfogattömeg nélkül.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 84,045 + (1,830 * \text{humusz}) - (0,006 * \text{agyag} * \text{homok}) - (0,003 * \text{homok}^2) - (35,705 * \text{pH}^{-1}) - (6,082 * \ln(\text{por})) - (0,004 * \text{agyag} * \text{por})$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 37,093 + (0,968 * \text{humusz}) + (0,002 * \text{agyag}^2) - (0,076 * \text{pH}^2) - (0,002 * \text{homok}^2) + (12,626 * \text{por}^{-1}) + (2,849 * \text{homok}^{-1})$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 55,503 + (1,294 * \text{humusz}) - (2,523 * \ln(\text{homok})) - (0,003 * \text{homok}^2) - (7,846 * \ln(\text{por})) + (0,002 * \text{agyag} * \text{homok})$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = -7,677 + (0,001 * \text{agyag}^2) - (0,056 * \text{CaCO}_3) + (0,044 * \text{humusz}^2) + (0,001 * \text{CaCO}_3^2) + (1,889 * \text{por}^{-1}) - (0,170 * \text{pH}^2) - (0,207 * \ln(\text{humusz})) + (2,639 * \text{pH})$$

$$\text{DV} = 20,054 + (0,003 * \text{por} * \text{homok}) - (0,074 * \text{pH}^2) - (0,003 * \text{agyag} * \text{homok}) - (0,332 * \text{humusz})$$

101. melléklet. A réti talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt átlagos négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	1150	21,08
CHAID2	1150	22,06
CRT_kat	1150	22,30
LR1_AB	1150	22,66

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

102. melléklet. A réti talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok	
		1	2
CRT3	1150	18,79	
CRT_kat	1150		22,92
CHAID2	1150		23,12
LR1_AB	1150		24,61

103. melléklet. A réti talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	1150	21,02
CRT_kat	1150	22,53
LR1_AB	1150	23,76
CHAID2	1150	24,68

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

104. melléklet. A réti talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok	
		1	2
LR1_AB	1150	1,15	
CRT3	1150	1,16	
CRT_kat	1150	1,32	1,32
CHAID2	1150		1,40

105. melléklet. A réti talajok hozzáférhető vízkészletének közvetlen becslésére és közvetett számítására (a -33 és -1500 kPa-hoz tartozó becsült víztartó képességekből) kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a becslő adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becsülő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	1150	23,09
LR1_AB	1150	23,12
CHAID2	1150	24,54
CRT_kat	1150	24,89

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

106. melléklet. A réti talajok -0,1 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt átlagos négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becsülő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	121	26,65
LR1_AB	121	26,89
CHAID2	121	27,61
CRT_kat	121	27,66

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

107. melléklet. A réti talajok -33 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becsülő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
LR1_AB	121	27,29
CRT_kat	121	28,26
CHAID2	121	30,71
CRT3	121	34,45

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

108. melléklet. A réti talajok -1500 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
CRT3	121	18,12
LR1_AB	121	19,63
CRT_kat	121	23,09
CHAID2	121	24,74

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

109. melléklet. A réti talajok -150000 kPa mátrixpotenciálhoz tartozó víztartó képességének becslésére kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok	
		1	2
CRT3	121	1,19	
LR1_AB	121	1,57	1,57
CHAID2	121	1,74	1,74
CRT_kat	121		1,94

110. melléklet. A réti talajok hozzáférhető vízkészletének közvetlen becslésére és közvetett számítására (a -33 és -1500 kPa-hoz tartozó becsült víztartó képességekből) kidolgozott módszerek négyzetes eltéréseinek vizsgálata Duncan teszttel, a teszt adatbázison vizsgálva. Az a módszer, aminél a mintákra számolt négyzetes eltérés (SE) szignifikánsan kisebb, vagy nagyobb külön csoportba kerül, a szignifikánsan nem különbözőek pedig ugyanabba a csoportba*.

Becslő módszer	Mintaszám	0,05 szignifikancia szinten elkülöníthető csoportok*
		1
LR1_AB	121	20,86
CRT_kat	121	22,79
CHAID2	121	23,31
CRT3	121	30,41

*Ebben az esetben a módszerek becslési hibája szignifikánsan nem különbözik egymástól.

111. melléklet. Pedotranszfer függvények talajcsoportok kialakítása nélkül, a talajok A és B szintjeire, a térfogattömeg és vízdoldhatóság-tartalom figyelembe vételével.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 99,575 - (30,308 * \text{térfogattömeg}) - (47,619 * \text{pH}^{-1}) + (4,367 * \text{por}^{-1}) + (2,924 * \text{só}^2) - (0,044 * \text{pH}^2)$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 5,080 - (10,603 * \ln(\text{térfogattömeg})) + (0,099 * \text{humusz}^2) + (0,004 * \text{agyag}^2) - (0,264 * \text{pH}) + (0,007 * \text{agyag} * \text{homok}) - (3,125 * \ln(\text{homok})) + (0,001 * \text{homok}^2) - (3,789 * \text{homok}^{-1}) - (0,022 * \text{CaCO}_3) + (10,717 * \text{só}^2) - (6,705 * \text{só}) + (26,664 * \text{por}^{-1}) + (9,096 * \ln(\text{por}))$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = -25,929 + (0,456 * \text{agyag}) + (1,063 * \text{humusz}) + (0,113 * \text{por}) + (0,006 * \text{agyag} * \text{homok}) - (2,133 * \ln(\text{homok})) - (5,437 * \ln(\text{agyag})) - (4,990 * \text{agyag}^{-1}) - (22,482 * \text{pH}^{-1}) - (0,021 * \text{CaCO}_3) + (50,201 * \text{térfogattömeg}^{-1}) + (34,131 * \ln(\text{térfogattömeg}))$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = -63,427 + (0,001 * \text{agyag}^2) + (4,139 * \text{só}) - (3,660 * \text{só}^2) - (0,029 * \text{CaCO}_3) + (137,811 * \text{pH}^{-1}) - (0,459 * \text{pH}^2) + (9,678 * \text{pH}) + (0,038 * \text{humusz}^2) - (0,508 * \text{homok}^{-1})$$

$$\text{DV} = 25,864 - (2,211 * \text{térfogattömeg}^2) + (1,898 * \ln(\text{por})) - (1,108 * \text{humusz}) - (4,827 * \ln(\text{pH})) - (0,053 * \text{agyag}) + (16,511 * \text{só}^2) - (12,147 * \text{só}) + (0,103 * \text{humusz}^2)$$

112. melléklet. Pedotranszfer függvények talajcsoportok kialakítása nélkül, a talajok A és B szintjeire, vízdoldhatóság-tartalom figyelembe vételével, térfogattömeg nélkül.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 60,204 + (1,189 * \ln(\text{humusz})) - (0,002 * \text{homok}^2) + (0,252 * \text{CaCO}_3) - (0,005 * \text{CaCO}_3^2) + (0,165 * \text{humusz}^2) + (0,006 * \text{agyag}^2) - (0,393 * \text{agyag}) - (8,745 * \text{só}) + (8,226 * \text{só}^2) - (2,125 * \ln(\text{por}))$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 13,036 + (0,163 * \text{humusz}^2) + (0,003 * \text{agyag}^2) - (0,030 * \text{pH}^2) - (2,076 * \ln(\text{homok})) - (2,045 * \text{homok}^{-1}) + (18,614 * \text{por}^{-1}) + (0,004 * \text{agyag} * \text{homok}) + (5,689 * \ln(\text{por}))$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 21,661 + (0,465 * \text{agyag}) + (1,123 * \text{humusz}) + (0,112 * \text{por}) + (0,006 * \text{agyag} * \text{homok}) - (2,082 * \ln(\text{homok})) - (5,592 * \ln(\text{agyag})) - (5,255 * \text{agyag}^{-1}) - (22,432 * \text{pH}^{-1}) - (0,018 * \text{CaCO}_3)$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = -63,427 + (0,001 * \text{agyag}^2) + (4,139 * \text{só}) - (3,660 * \text{só}^2) - (0,029 * \text{CaCO}_3) + (137,811 * \text{pH}^{-1}) - (0,459 * \text{pH}^2) + (9,678 * \text{pH}) + (0,038 * \text{humusz}^2) - (0,508 * \text{homok}^{-1})$$

$$\text{DV} = 16,522 + (0,042 * \text{por}) - (0,046 * \text{pH}^2) - (0,763 * \text{humusz}) + (0,001 * \text{por} * \text{homok}) - (0,001 * \text{agyag} * \text{homok}) + (0,058 * \text{CaCO}_3) - (0,001 * \text{CaCO}_3^2) + (17,004 * \text{só}^2) - (12,884 * \text{só}) + (0,088 * \text{humusz}^2)$$

113. melléklet. Pedotranszfer függvények talajcsoportok kialakítása nélkül, a talajok A és B szintjeire, a térfogattömeg figyelembe vételével, vízdoldhatóság-tartalom nélkül.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = 97,022 - (30,178 * \text{térfogattömeg}) - (35,087 * \text{pH}^{-1}) + (3,688 * \text{por}^{-1}) - (0,031 * \text{pH}^2) + (0,069 * \text{humusz}^{-1})$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 53,505 - (0,303 * \text{homok}) - (0,002 * \text{por}^2) + (13,839 * \text{térfogattömeg}^{-1}) + (0,106 * \text{humusz}^2) - (0,404 * \text{pH}) - (0,004 * \text{agyag} * \text{por}) - (3,594 * \ln(\text{homok})) + (0,003 * \text{agyag} * \text{homok}) - (4,238 * \text{homok}^{-1})$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = -33,339 + (0,437 * \text{agyag}) + (1,009 * \text{humusz}) - (3,157 * \ln(\text{homok})) + (0,007 * \text{agyag} * \text{homok}) - (6,209 * \ln(\text{agyag})) - (5,739 * \text{agyag}^{-1}) + (15,086 * \text{por}^{-1}) + (4,054 * \ln(\text{por})) - (23,194 * \text{pH}^{-1}) - (0,024 * \text{CaCO}_3) - (2,136 * \text{homok}^{-1}) + (53,367 * \text{térfogattömeg}^{-1}) + (36,731 * \ln(\text{térfogattömeg}))$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = -51,895 + (0,001 * \text{agyag}^2) - (0,012 * \text{homok}) + (113,911 * \text{pH}^{-1}) - (0,028 * \text{CaCO}_3) - (0,477 * \text{homok}^{-1}) + (0,046 * \text{humusz}^2) - (0,364 * \text{pH}^2) + (7,885 * \text{pH}) + (0,105 * \text{térfogattömeg}^2)$$

$$\text{DV} = 10,019 - (2,309 * \text{térfogattömeg}^2) + (2,012 * \ln(\text{por})) - (0,583 * \text{humusz}) + (39,293 * \text{pH}^{-1}) - (0,067 * \text{agyag})$$

114. melléklet. Pedotranszfer függvények talajcsoportok kialakítása nélkül, a talajok A és B szintjeire, vízdhatóság-tartalom és térfogattömeg nélkül.

$$\theta_{-0,1\text{kPa}} = -220,219 + (0,967 * \ln(\text{humusz})) - (0,002 * \text{homok}^2) + (0,215 * \text{CaCO}_3) - (0,004 * \text{CaCO}_3^2) + (0,173 * \text{humusz}^2) + (0,005 * \text{agyag}^2) - (0,375 * \text{agyag}) - (2,525 * \ln(\text{por})) - (2,088 * \text{pH}^2) + (42,669 * \text{pH}) + (596,170 * \text{pH}^{-1}) + (0,166 * \text{humusz}^{-1})$$

$$\theta_{-33\text{kPa}} = 57,399 - (0,314 * \text{homok}) - (0,003 * \text{por}^2) + (0,156 * \text{humusz}^2) - (0,005 * \text{agyag} * \text{por}) - (3,879 * \ln(\text{homok})) - (0,024 * \text{pH}^2) - (4,492 * \text{homok}^{-1}) + (0,002 * \text{agyag} * \text{homok}) - (0,120 * \text{humusz}^{-1}) + (12,888 * \text{por}^{-1}) + (2,074 * \ln(\text{por}))$$

$$\theta_{-1500\text{kPa}} = 17,333 + (0,443 * \text{agyag}) + (0,671 * \text{humusz}) - (3,091 * \ln(\text{homok})) + (0,007 * \text{agyag} * \text{homok}) - (6,240 * \ln(\text{agyag})) - (5,831 * \text{agyag}^{-1}) + (14,853 * \text{por}^{-1}) + (4,059 * \ln(\text{por})) - (23,382 * \text{pH}^{-1}) - (0,023 * \text{CaCO}_3) - (2,071 * \text{homok}^{-1}) + (0,086 * \text{humusz}^2)$$

$$\theta_{-150000\text{kPa}} = -47,583 + (0,001 * \text{agyag}^2) - (0,012 * \text{homok}) + (105,031 * \text{pH}^{-1}) - (0,029 * \text{CaCO}_3) - (0,478 * \text{homok}^{-1}) + (0,043 * \text{humusz}^2) - (0,335 * \text{pH}^2) + (7,283 * \text{pH})$$

$$\text{DV} = 5,546 + (0,050 * \text{por}) + (0,002 * \text{por} * \text{homok}) + (47,932 * \text{pH}^{-1}) - (0,264 * \text{humusz}) + (0,069 * \text{CaCO}_3) - (0,001 * \text{CaCO}_3^2) - (0,001 * \text{agyag} * \text{homok})$$

115. melléklet. A feltalaj és altalaj megkülönböztetését nem, de a vízdhatóság-tartalmat figyelmebe vevő, talajcsoportosítás nélkül kidolgozott regressziós fák főbb tulajdonságai. A modell input paraméterei: talaj altípus, agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalom (tömeg %), humusz (tömeg %), kalcium-karbonát (tömeg %) és vízdhatóság-tartalom (tömeg %), valamint pH_{H2O}.

Becsült víztartó képesség	A becsléshez figyelmebe vett input paraméterek (fontossági sorrendben)	Elkülönített csoportok száma
$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	humusz, por, homok, pH, agyag, kalcium-karbonát, altípus, só	33
$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	homok, agyag, por, humusz, altípus, kalcium-karbonát, pH, só	41
$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	agyag, homok, humusz, só, por, altípus, kalcium-karbonát, pH	39
$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	agyag, homok, humusz, por, só, kalcium-karbonát, pH, altípus	40

116. melléklet. A vízdhatóság-tartalmat nem, de feltalaj és altalaj megkülönböztetését figyelmebe vevő, talajcsoportosítás nélkül kidolgozott regressziós fák főbb tulajdonságai. A modell input paraméterei: talaj altípusa, az altalaj és feltalaj megkülönböztetése, agyag (<0,002 mm), por (0,002-0,05 mm) és homok (0,05-2 mm) tartalom (tömeg %), humusz tartalom (tömeg %), kalcium-karbonát tartalom (tömeg %) és pH_{H2O}-t

Becsült víztartó képesség	A becsléshez figyelmebe vett input paraméterek (fontossági sorrendben)	Elkülönített csoportok száma
$\theta_{-0,1 \text{ kPa}}$	humusz, por, homok, pH, agyag, kalcium-karbonát, altípus, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	42
$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	homok, agyag, por, humusz, altípus, kalcium-karbonát, pH, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	37
$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	agyag, homok, humusz, por, altípus, kalcium-karbonát, pH, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	57
$\theta_{-150000 \text{ kPa}}$	agyag, homok, humusz, por, kalcium-karbonát, pH, altípus, feltalaj és altalaj megkülönböztetése	40