



A fagyás és az olvadás hatása az útpályaszerkezetekre

**Kalicz Péter¹, Herceg András¹, Primusz Péter¹
Gribovszki Zoltán¹**

¹ Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Földmérési, Térképészeti, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet

E-mail: kaliczp@gmail.com; herceg.andras@uni-sopron.hu; primusz.peter@uni-sopron.hu; zgribo@gmail.com

DOI: [10.36246/UL.2021.1.01](https://doi.org/10.36246/UL.2021.1.01)

KIVONAT

A környezeti jellemzők (elsősorban a hőmérséklet, a csapadék, a légnedvesség, a talajvíz mélysége, valamint a fagyás-olvadás ciklusok) jelentős hatást gyakorolnak az útburkolatok állapotára és élettartamára, ezért a pályaszerkezetek méretezésénél is fontos tényezőként veendő figyelembe.

Jelen cikk a fagyás és az olvadás útpályaszerkezetekre gyakorolt hatásait elemzi Magyarországon, három vizsgálati időszakra nézve: 1951-1980; 1981-2010; 2016-2045. A fagyás, de különösen az azt követő olvadás következtében előálló talajnedvesség növekedés, valamint földmű teherbírás csökkenés veszélyes lehet a pályaszerkezetre.

A fagyási indexek, 1981-2010 időszakra vonatkoztatott országos átlaga tekintetében 1951-1980 időszakhoz képest erőteljesebb, majd a REMO klímamodell előrejelzései szerint enyhébb csökkenés prognosztizálható a 2016-2045-ös periódusban.

A tél végén a hőmérsékletek növekedése (közel 2 °C-os a havi átlaghőmérséklet növekedés februárban, az 1951-80-as és a 2016-2045-ös között) és a 0 °C alatti hőmérsékletű napok számának csökkenése (~ 4,4 napos csökkenés februárban 1951-80-as és a 2016-2045-ös időszak között) erőteljes. 1951-80-as időszakhoz képest, az 1981-2010-es periódusban a tavaszi talajnedvességek mintegy 22%-os relatív értékű csökkenése következett be. A jövőben további csökkenés prognosztizálható (a REMO modell: ~15%-os átlagos csökkenés valószínűsíthető tavasszal).

Az előbbieket alapján valószínűsíthető, hogy az olvadási kárral leginkább veszélyeztetett időszak korábbra tolódik és a február hónapra egy lényegesen alacsonyabb földmű modulus, májusra azonban a szárazodás és magasabb hőmérsékletek miatt valószínűleg növekvő földmű modulusz (földmű teherbírásának növekedése) lesz jellemző.

Kulcsszavak: pályaszerkezet méretezés, klímaváltozás, földmű, fagyási index, olvadás

ABSTRACT

Environmental parameters (primarily temperature, precipitation, air humidity, freeze-thaw cycles and groundwater depth) have a significant impact on the condition and lifespan of pavements, therefore they can be taken into account as critical factors during pavement design methods.

This article analyzes the effects of freezing and thawing on the pavements in Hungary for three investigational periods: 1951-1980; 1981-2010; 2016-2045. An increase in soil moisture as a result of freezing, but especially subsequent melting, as well as a reduction in the bearing capacity of the subgrade can be dangerous for the pavements.

At the end of winter there is a strong increasing tendency in temperatures (nearly 2 °C monthly average temperature increases in February, between 1951-80 and 2015-2045) and simultaneously a significant decrease in the number of days with temperatures below 0 °C (~ 4.4 days decrease in February between 1951-80 and 2015-2045) may be occurred. With regard to the national average of freezing indices, a stronger decrease has been found in the 1981-2010 period compared to the period 1951-1980, and then, according to the projections of the

REMO climate model, a smaller decrease can be projected in the period 2016-2045. In the period 1981-2010, there was a decrease in spring soil moisture with a relative value of about 22%, compared to the period 1951-80. In the future there will be further decrease (according to the REMO model) with an average decrease of ~ 15% (in spring).

Based on the above, it is likely that the period most at risk from melt damage will be shifted earlier, thus a significantly lower subgrade modulus will be expected for February, while the month May is likely to have an increasing subgrade modulus (i.e., the bearing capacity of the subgrade is expected to increase) due to drought and higher temperatures.

Keywords: pavement design, climate change, subgrade, freezing index, thaw

Dr. Kalicz Péter

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Földmérési, Térképészeti, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe a hidrológiai modellezés, intercepció automatizálása.

Dr. Herceg András

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Földmérési, Térképészeti, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe a vízmérleg-modellezés.

Dr. Primusz Péter

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Földmérési, Térképészeti, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése.

Prof. Dr. Gribovszki Zoltán

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Földmérési, Térképészeti, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az öko-hidrológia, evapotranszspiráció számítása a talajnedvesség, a talajvíz és a lefolyás nagy gyakoriságú mérése alapján.

1. BEVEZETÉS

A környezeti jellemzők, mint a hőmérséklet, csapadék, légnedvesség, fagyás-olvadás ciklusok és a talajvíz mélysége jelentős hatással vannak az útburkolatok állapotára és élettartamára, ezért a pályaszerkezetek méretezésénél is fontos tényezőként vehetők figyelembe. Az időjárásnak való kitettség hatása a vékonyabb pályaszerkezeteknél erőteljesebb lehet, ezért különösen fontos a környezeti jellemzők alaposabb vizsgálata az alsóbbrendű vagy mezőgazdasági utaknál, az erdők feltáráshálózatánál, és az agro-erdészeti rendszerek kiszolgáló útjainál.

A klimatikus jellemzők változásában valószínűleg a szélsőséges időjárási események gyakoriságának növekedése várható. A legfontosabb befolyásoló események lehetnek a nagy intenzitású felhőszakadásszerű esőzések és ennek vízelvezetési problémái, a jelentős szélviharok, a nyári időszakokban fellépő hosszabb aszályos időszakok megjelenése, valamint a hóhullámok és a korai és a kései fagyok [1].

Tekintettel kell lenni az előbbieken felsoroltak mellett a klimatikus jellemzők szezonális változékonyságára is, és a pályaszerkezetek méretezését javallott ezekhez a szezonális változásokhoz kapcsolni [11]. Az aszfalt rétegek hőmérsékletének változásai lényegesek, mert az aszfaltkeverékek modulusai nagyon érzékenyek a hőmérsékletváltozásra. A hajlékony pályaszerkezetek méretezésénél emellett az alsó rétegek (főként a földmű) talajnedvességének változásai a meghatározóak. A földmű modulusok általában az optimális talajnedvességre és sűrűsége (tömörségre) vonatkoznak, de javarészt viszont az optimálistól eltérő jellemzőkre korrekciós faktorok szükségesek. Továbbá a fagyás-olvadás jelensége és ennek ciklusai is igen jelentősen befolyásolják az alsó rétegek és a földmű

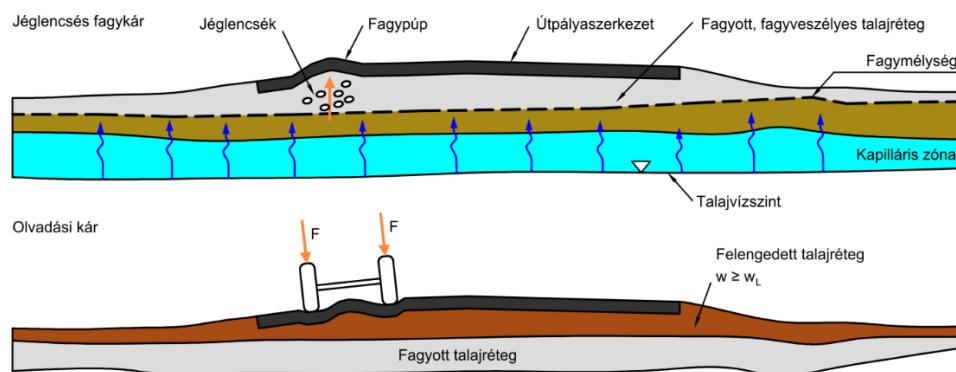
teherbírását. Hiszen a fagyos periódusok alatt a földmű teherbírása nő, míg az olvadási periódusok alatt jelentősen csökken, tehát a fagyás mélységének és az egyes olvadási ciklusok egymásra következésének ismerete is egy fontos kérdés.

Az aszfaltburkolatú pályaszerkezetek tartósságának számításánál, az egyszerűen meghatározható és általában könnyen elérhető meteorológiai paraméterek közül, a hőmérséklet, ennek ingadozása és a csapadék a figyelembe vehető tényezők [2]. Az Útügyi Lapok c. folyóirat 13. lapszámában közölt: „*A klimatikus jellemzők hatásai az útpályaszerkezetre*” című kézirat dolgozta fel ennek a két paraméternek az általános változási tendenciáit Magyarországon, figyelembe véve a klímaváltozást [12]. A 14. lapszámában közölt *A klimatikus jellemzők hatásai az útpályaszerkezetre: A pályaszerkezet hőmérsékletek számítása* c. cikk a pályaszerkezet hőmérsékletek számításának lehetőségeivel foglalkozott [13]).

Jelen cikk pedig a fagyás és az olvadás útpályaszerkezetre gyakorolt hatásait elemzi.

2. FAGYÁS, OLVADÁS ÁLTALÁNOS HATÁSAI

A fagyás, de különösen az azt követő olvadás következtében előálló talajnedvesség növekedés, valamint földmű teherbírás csökkenés veszélyes lehet a pályaszerkezetre. A hatásokat az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A pályaszerkezetben bekövetkező fagyási és olvadási kár ([2] nyomán).

A következőben először a fagyás révén előálló fagykárt, majd a fagyok elmúltával bekövetkező olvadás és annak folyamánként bekövetkező olvadási kárt mutatjuk be.

3. FAGYKÁR

A fagykár a megfagyott víz térfogat növekedésének következménye (az eredeti térfogat durván 1/9-ével nő szilárd halmazállapotban a jég térfogata, a cseppfolyós halmazállapotú és azonos tömegű vízhez képest). Hatását a pályaszerkezeti rétegekben és földműben is kifejti.

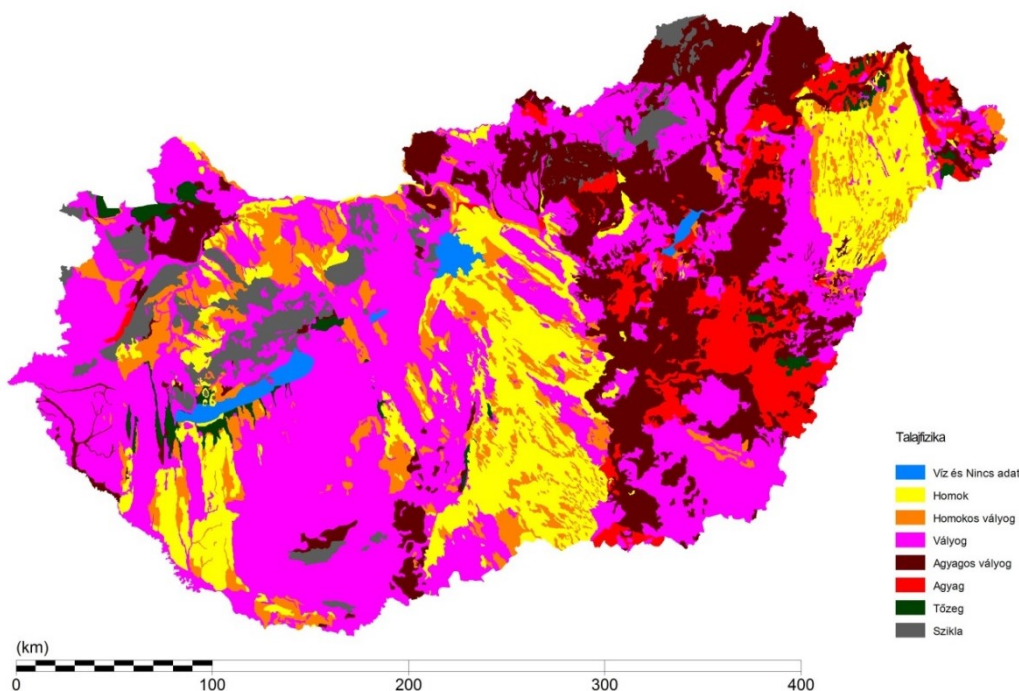
Bár az aszfaltburkolat repedésmentes állapotában érzéketlen a fagyra, viszont, ha hajszálrepedések jelennek meg a burkolatban, akkor azokon keresztül bejutó víz megfagyva meggyorsíthatja a rongálódási folyamatot. Ezt a rongálódási folyamatot elsősorban nem a fagyás indukálja, hanem pl. a „fáradás”, amelynek hatására a hajszálrepedések elsődlegesen képződnek.

Az alaprétegben akkor keletkezhet fagykár, ha maga az alaprétegnek felhasznált szemcsés anyag fagyveszélyes (1. táblázat). A cementstabilizált alapréteg fagyérzékenysége pedig abban mutatkozhat meg, hogy az alacsony cementadagolás esetében az széteshet.

1. táblázat: Talajok fagyérzékenysége ([2] nyomán).

Érzékenység	Talajfajta	Finom részek [tömeg %]		Plasztikus index
		<0,02 mm	<0,1 mm	Ip[%]
Fagyálló	Homokos kavics	<10	<25	-
	Kavicsos homok			
	Homok			
Fagyérzékeny	Iszapos kavics	10-15	25-40	-
	Iszapos homok			
	Agyag			
Fagyveszélyes	Homokliszt	<10	-	15,1<
	Iszapos homokliszt	10<	-	1,0-5,0
	Iszap	-	40-90	5,1-10,0
	Iszap	-	-	10,1-15,0

Az előző táblázathoz kapcsolódóan mutatjuk be a 2. ábrát, amely az Agrotopográfiai térkép alapján a talajok fizikai féleségét prezentálja a fagyveszélyes talajok térbeli elhelyezkedésének szemléltetésére. Az 1. táblázat és a 2. ábra kategóriái teljes mértékben nem feleltethetők meg egymásnak. A kapcsolatot a 2 mm alatti szemcsék, homok (0,05–2,0 mm), iszap (0,002–0,05 mm) és agyag (<0,002 mm) kategóriái közötti megoszlását figyelembevevő textúrára vonatkozó háromszögdiagram teremtheti meg [14]. Azok a talajok, amelyek dominánsan egy jellemző frakcióból állnak osztályozhatók homok, iszap és agyag fizikai féleségüként (ezek a háromszögdiagram sarkaiban találhatóak). A különböző szemcseméretekből közel azonos mennyiségű szemcsét tartalmazó talajok pedig az ún. vályog kategóriába sorolhatóak (háromszögdiagram középontja).



2. ábra: A talajok fizikai féleségének megoszlása Magyarországon (forrás: Agrotopográfiai térkép).

A „fagykár” a megfelelően megválasztott és fagyállóságra bevizsgált anyagok alkalmazásával, a pályaszerkezet rétegeiben elkerülhető. A méretezés alapfeltétele, hogy a fagyállósági követelményeket kielégítsük, így ennek a méretezésre nincs hatása.

A földmű esetében viszont, az azt alkotó talajoknál megkülönböztethetünk „tömbfagyást” és „jéglencsés fagyást”.

A „tömbfagyás” a szemcsés talajok jellemzője, ahol a talaj pórusaiban megfagyó víz térfogat növekedése olyan típusú, hogy nem eredményezi a talaj számottevő térfogat növekedését.

A „jéglencsés fagyás” viszont a finomszemcsés talajokra jellemző, ahol kialakuló ún. fagyási góccok térfogat növekedést okoznak. A fagyási góccok megjelenése szívóhatással jár, hiszen az alacsonyabb

hőmérséklet következtében a talajban lévő pára a melegebb helyről a hidegebb helyre (mint alacsonyabb párányomású, tehát abszolút értelemben szárazabb helyre) áramlik. Az ide áramló nedvesség a fagypont alatti hőmérséklet miatt kifagy, tehát az ideáramló nedvesség ellenére sem növekszik a párányomás, hanem alacsony szinten marad. Az előbbieket miatt a párafluxust fenntartó gradiens jelentős marad, ami így további nedvesség ide áramlását eredményezi. Igaz ez annak ellenére, hogy az alsó melegebb talajréteg fokozatosan szárad. A fagyási göcök tehát tovább növekednek, és ezáltal nő a jéglencsék térfogata. Végeredményképpen az ilyen fagyási göcök a felszint több cm-el megemelhetik. Érdekes azt is megemlíteni, hogy a jéglencsés fagyás esetében (a nyomóerők miatt) a víz fagyáspontja lecsökken kb. $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ennek eredményeképpen a jéglencsés fagyás határa nem a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os izoterma szintjén van, hanem a hideg felszínhez közelebb [9].

A jéglencsés terepfelszín (vagy burkolatfelszín) emelkedés (ú.n. fagyemelkedés) tipikus fajtája a mi klímánkon ritka jelenség. A jéglencsék egyenletes eloszlása következtében viszont a finomszemcsés talajok esetében bizonyos fagyemelkedés jelentkezik. Sőt előállhat a jelenség akkor is, amikor a klasszikusnak vett talajvízből származó nedvesség utánpótlódására nincs lehetőség [2].

A jéglencsés fagykár forgalomfüggetlen, így a forgalomra való méretezésnél nem, csak a méretezés kiindulásakor a fagyállósági követelmények teljesítésével veendő figyelembe [2].

3.1. A FAGYBEHATOLÁSI MÉLYSÉG SZÁMÍTÁSA

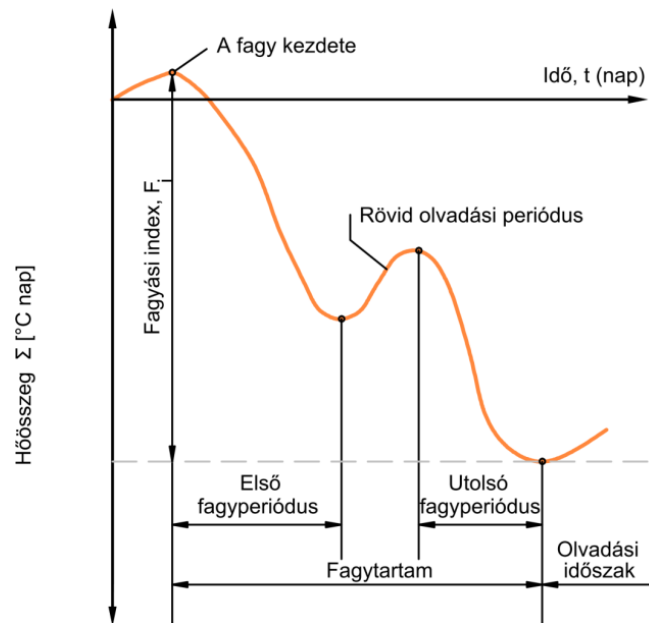
A fagynak a talajba való lehatolása a gyakorlati élet számos területét közelről érinti. Az útburkolatok állékonyságának érdekében a reálisan várható fagyveszély ellen valamilyen módon a tervezés során fel kell lépni. Ez a tervezés során méretezésként legtöbbször a mértékadó útépítési fagyhatár értékének (amely nagyjából a fagybehatolási mélységgel azonosnak vehető) meghatározását jelenti [9].

A fagybehatolási mélység alapján tervezhető a fagy elleni védekezés. A legnagyobb fagybehatolási mélység azonban nem önmagától a legalacsonyabb hőmérséklettől függ, hanem a fagytartam alatti napi középhőmérsékletektől és az ezekből számított hidegmennyiségtől.

A fagybehatolási mélység az a terepszinttől vertikálisan lefelé mért távolság, melyben az átfagyott talaj a még nem fagyott talajjal érintkezik [3]. Ez a mélységet tulajdonképpen a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os izoterma adja meg. Ezt az izotermát a fagy mélységet közrefogó mélységekhez tartozó talajhőmérsékleti adatokból lehet, pl. interpoláció útján meghatározni, bár a talajhőmérsékleti adatok csak korlátozott számban állnak rendelkezésre. Megoldásként szolgálhat az a nemzetközileg is validált, eredetileg [5] által levezetett összefüggés, amely szerint a fagybehatolási mélység a fagyási index négyzetgyökével arányos.

A fagyási index viszont léghőmérséklet adatok alapján számítható. Definíció szerint a hőösszeg görbén a fagytartam alatti maximum és minimum közötti különbség Celsiusnap-ban kifejezve. A hőösszeg görbe az értelmezés szerint valamely adott naptól kezdve a napi középhőmérsékletek összegének (Celsius nap) menetét megjelenítő diagram.

Más megfogalmazás szerint a fagyási index (a hidegmennyiség számértéke) a fagyperiódus alatti napok számának a Celsius fokban kifejezett átlaghőmérséklettel való szorzata foknapban kifejezve. A fagyási indexet tehát úgy számítjuk, hogy a negatív középhőmérsékletű napok középhőmérsékleteit összeadjuk, vesszük az abszolút értéküket és ebből az összegből a pozitív középhőmérsékletű napok középhőmérsékletinek összegét levonjuk. A tervezés szempontjából a mértékadó a fagyási index az elmúlt 30 év 3 leghidegebb telén észlelt fagyási indexek átlaga (Boromisssa 1997). A fagyási indexet szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra: A téli hőösszeg-görbe és a fagyási index sematikus ábrázolása ([3] nyomán).

Később Shannon laboratóriumi körülmények között is igazolta a Breggen-féle összefüggést, a következő egyenlet segítségével:

$$Z_f = k \cdot F^{0,5} \tag{1}$$

Ahol:

- Z_f: a fagybehatolási mélység cm-ben;
- F: a fagyási index Celsius nap-ban;
- k: pedig egy állandó.

A *k* tényező Shannon által becsült értéke: *k*=3,8-ra, amely Európai szinten is elfogadott [3]. A számítások alapján Magyarország esetén hasonló a *k* tényező, átlagosan 3,7.

A fagybehatolási mélységeknél azonban ajánlatos azt is figyelembe venni, hogy a pályaszerkezet saját fizikai jellemzői (hővezető, hőtároló képesség, stb.) függvényében is módosítja a fagybehatolás mélységét.

Az előbbieket szerint tehát a talajokra általában megadott összefüggés nem valószínű, hogy az útburkolatok alatt is ugyanúgy érvényes. A fagybehatolási mélység egy svájci szabályozás szerint [16], amely a pályaszerkezet mélységét is figyelembe veszi a következőképpen számítható.

$$Z_{pf} = 45 \cdot F^{0,5} + \frac{D}{2} \tag{2}$$

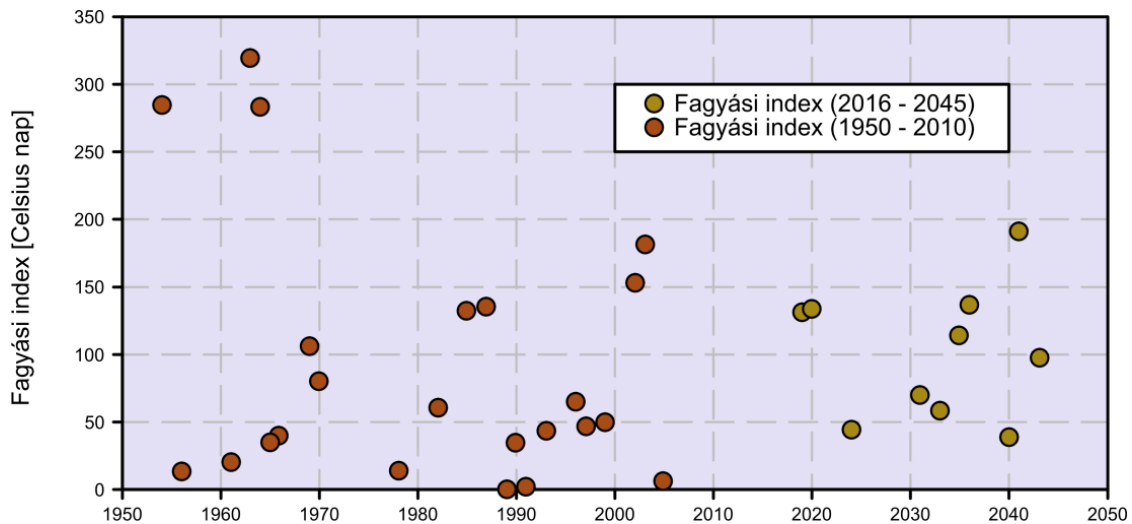
Ahol:

- Z_{pf}: a fagy behatolási mélység a pályaszerkezet alatt [mm];
- F: a fagyási index Celsiusnap-ban;
- D: a pályaszerkezet vastagsága [mm].

Az utak pályaszerkezet alatti fagybehatolási mélységére vonatkozó összefüggés alapján az látszik, hogy a fagybehatolási mélység nagyobb a pályaszerkezet alatt általában, mint a zavartalan talajfelszín esetében. Ez egyrészt a fagyási index nagyobb szorzójából, másrészt az újabb (pályaszerkezet alatti fagyási mélységet számító) egyenletben megjelenő, a pályaszerkezet fele vastagságát figyelembevevő, összeadó-állandóból következik (ami a természetes talajra vonatkozó egyenletben nem jelent meg).

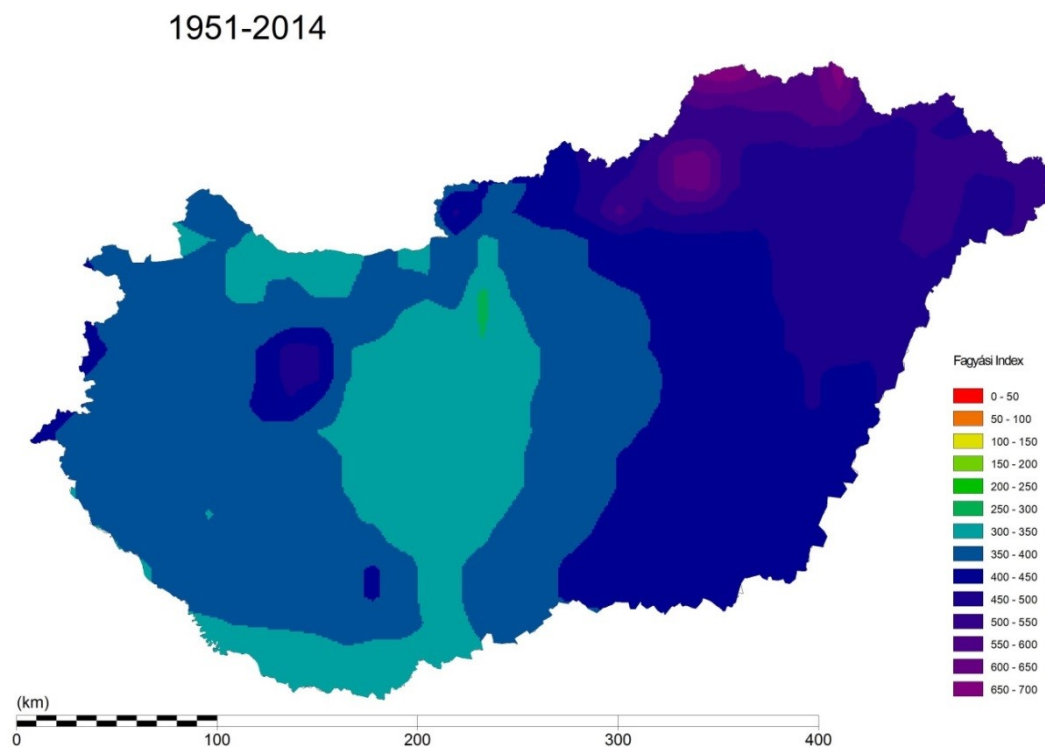
3.2. FAGYÁSI INDEXEK ÉS FAGYBEHATOLÁSI MÉLYSÉG ALAKULÁSA MAGYARORSZÁGON

Budapest környékére vonatkozó a fagyási indexeket (mint jó országos átlagot képviselő hely) a 4. ábra mutatja. Az ábra alapján tetten érhető, hogy 1963/64 tele mértékadó volt ebből a szempontból, 320-as fagyási indexel (kb. 66 cm-es fagybehatolási mélységgel). Az 1980-óta eltelt időszakban a 2003/2004-es tél volt a legjelentősebb, bár ennek fagyási index már csak 181 volt (kb. 50 cm-es fagybehatolási mélységgel). A jövőre vonatkozóan, a REMO modell korrigált adatai szerint, nem várható jelentős mértékű csökkenés a fagyási indexekben (4. ábra). Az elkövetkezendő 30-évre vonatkozóan a maximális fagyási index 190 Celsius nap, ami kb. 51 cm-es fagybehatolási mélységet jelent a talajokban.



4. ábra: Fagyási indexek változása Budapest környékén (1951-2014).

A következő 5. ábra megjelenített térkép az 1951-2014-es időszakra készült fagyási indexeket mutatja országos léptékben.



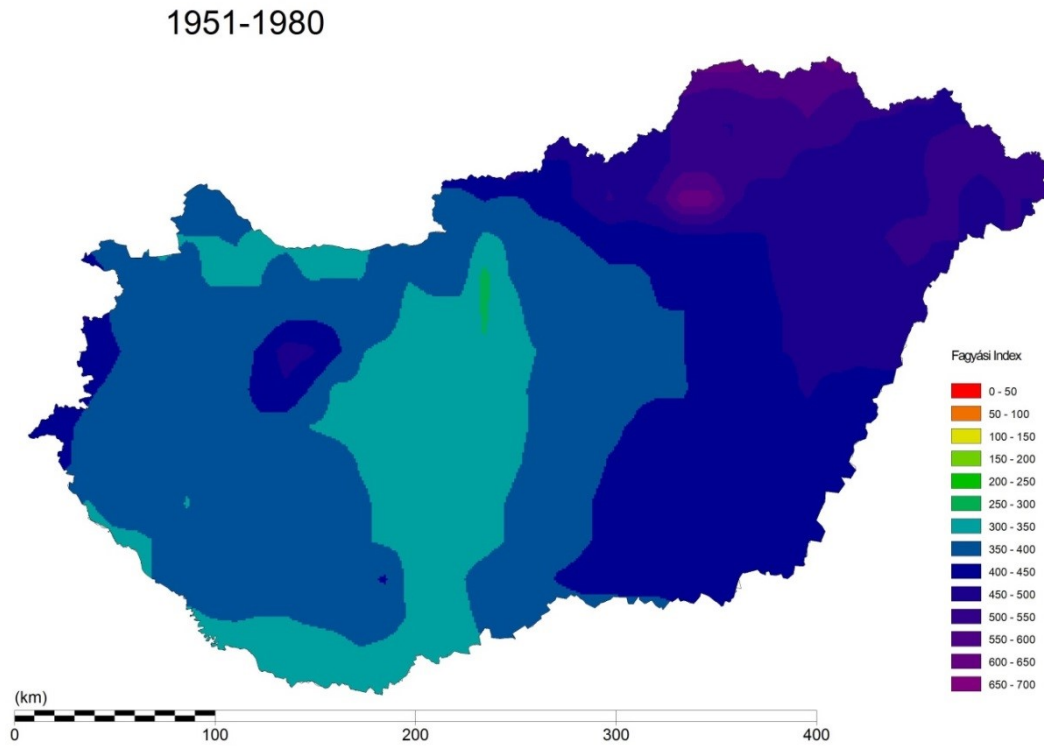
5. ábra: A fagyási indexek az 1951-2014-es időszakra vonatkozóan.

Az 1951-2014-es időszakban a fagyási index területi átlaga Magyarországra 406 Celsius nap. A maximum, az Északi-Középhegység magasabb területein jellemző 685 Celsius nap, míg a minimum a DNY Dunántúlon található (286 Celsius nap). A fagyási indexek régiók szerinti eloszlását a Hiba! A hivatkozási forrás nem található. 2. táblázat mutatja.

2. táblázat: A fagyási indexek megoszlása az egyes régiókban az 1951-2014-es időszakban.

Osztály	Min.	Max.	Átlag	Szórás
BK	286	461	355	29,52
D	307	406	355	19,12
DA	313	453	399	35,63
EA	367	514	459	36,21
EM	360	685	489	68,29
KD	306	473	362	36,35
NYD	339	425	371	15,50

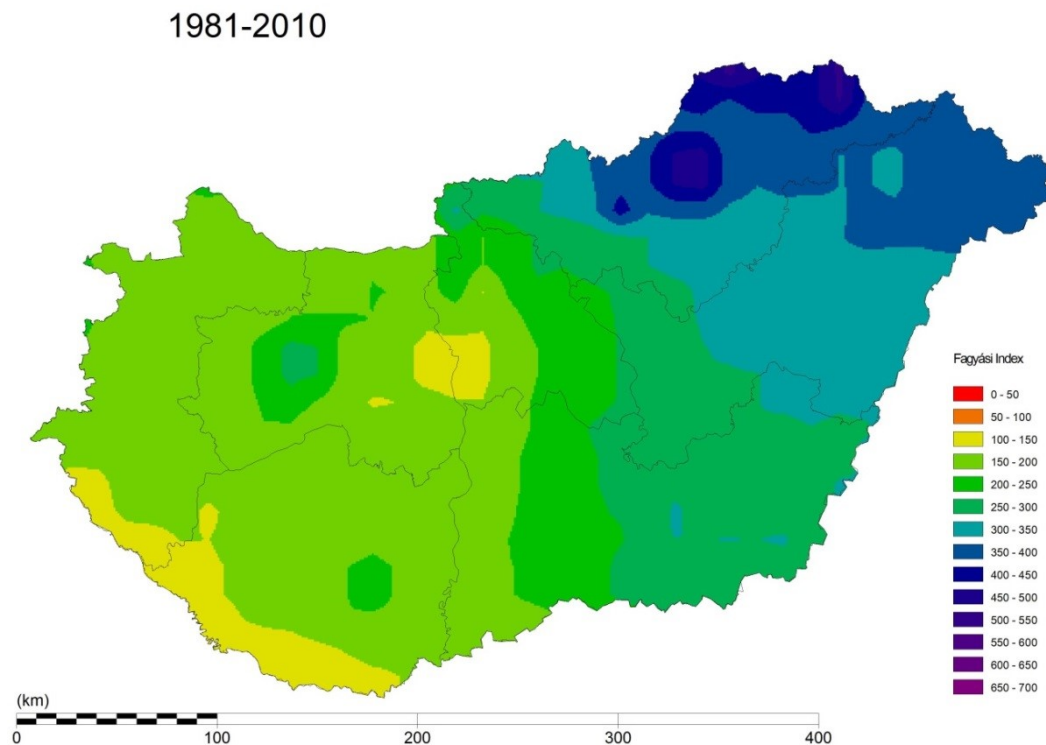
A fagyási indexek múltira, jelenre és jövőre vonatkozó értékei között jelentősebb eltérés lehetséges, ezért a klimatikus vizsgált 30 éves időszakokra (1951-1980, 1981-2010 és 2016-2045) is elkészítettük a fagyási index értékeket. A fagyási index adatok térbeli eloszlását a 6., 7. illetve 8. ábrák, valamint a 4. 5. és 6. táblázatok mutatják.



6. ábra: A fagyási indexek az 1951-1980-as időszakra vonatkozóan.

3. táblázat: A fagyási indexek megoszlása az egyes régiókban az 1951-1980-as időszakban.

Régió	Min.	Max.	Átlag	Szórás
BK	287	416	354	28,18
D	310	405	356	18,43
DA	314	453	396	34,89
EA	369	515	458	37,89
EM	362	635	482	58,25
KD	306	473	364	33,44
NYD	340	460	373	19,03



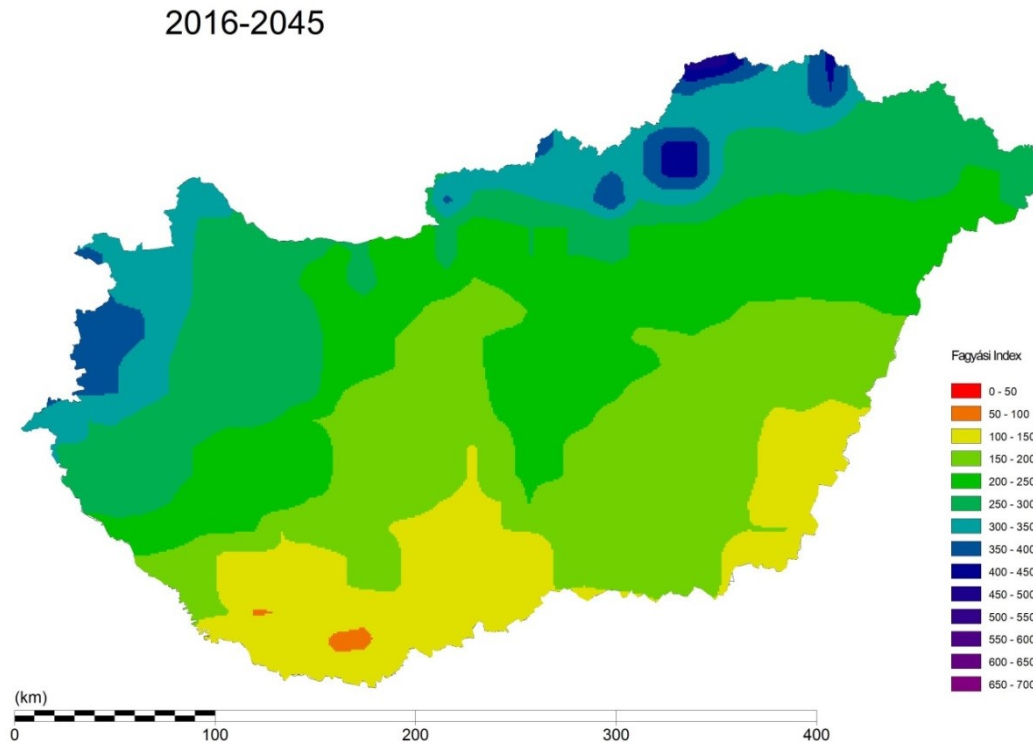
7. ábra: A fagyási indexek az 1981-2010-es időszakra vonatkozóan.

4. táblázat: A fagyási indexek megoszlása az egyes régiókban az 1981-2010-es időszakban.

Régió	Min	Max	Átlag	Szórás
BK	141	309	211	36,95
D	119	216	165	18,34
DA	151	323	247	45,47
EA	234	383	325	32,57
EM	219	513	357	58,73
KD	141	263	182	25,61
NYD	122	220	167	12,28

A 6. ábra alapján megállapítható, hogy az 1951-80-as időszakban a fagyási indexek országos átlaga 404 Celsius nap (a szórása 60 körüli) 634-es maximummal az Északi Középhegységben és 287 körüli minimummal Budapesttől délre. Az 1981-2010-es időszakban a fagyási indexek országos területi átlaga már csak 245 Celsius nap (a térbeli szórás értéke 82) 512-es maximummal és 119-es minimum értékkel. Az előbbieket szerint a két egymást követő 30-éves periódusban a fagyási indexek országos átlaga közel 160-as értékkel csökkent, a térbeli szóródás azonban jelentősen nőtt.

A jövőre vonatkozóan a 8. ábra, és 6. táblázat alapján a 2016-45-ös periódusban, a REMO modell előrejelzései szerint, a fagyási indexek országosan kismértékben tovább csökkennek 245 Celsius napról 221-es értékre. A maximum (480 Celsius nap) és a minimum (87 Celsius nap) érték is tovább csökken. Az országos eloszlás a klímamodell szerint kissé módosul, de ezt fenntartásokkal ajánlatos kezelni, mivel a klimatikus előrejelzések becslések és nem valós méréseknek. Az előrejelzések szerint térbeli szóródás feltehetően kismértékben csökken majd.



8. ábra: A fagyási indexek a 2016-2045-ös időszakra vonatkozóan.

5. táblázat: A fagyási indexek megoszlása az egyes régiókban a 2016-2045-ös időszakban.

Régió	Min.	Max.	Átlag	Szórás
BK	154	364	218	30,96
D	87	251	161	36,44
DA	103	221	158	24,08
EA	140	288	217	34,20
EM	216	480	303	52,20
KD	163	304	234	39,03
NYD	198	381	299	36,53

3.3. FAGYÁSBEHATOLÁSI MÉLYSÉG

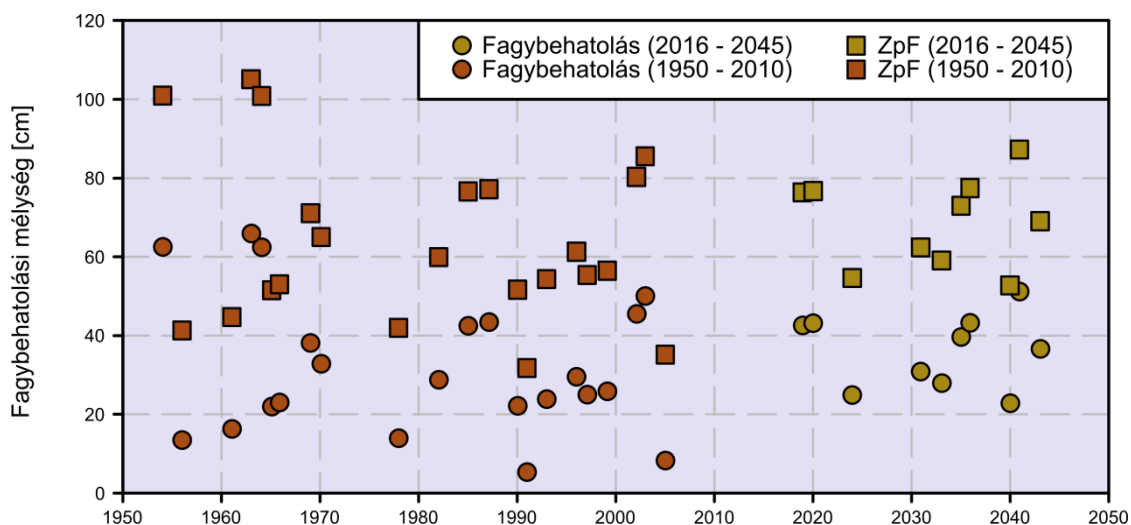
Bár a fagybehatolási mélység függ az adott talaj hővezetési és hőkapacitási értékeitől is, mégis lehetőség van, hogy körülbelüli becslést tegyünk a természetes talajokban, valamint az útpályaszerkezetek alatt jellemző értékekre az egyes időszakokban.

A továbbiakban példaként nézzük idősorszerűen Budapest környékére vonatkozóan a fagybehatolási mélység alakulását a természetes talajokban és az útpályaszerkezet alatt, a korábbi általános képlet szerint (9. ábra).

A számítások során a pályaszerkezet vastagságára 50 cm-es értéket vettünk figyelembe.

A Budapesti fagyási index értékekkel 1963/64 telére vonatkozóan a 320-as fagyási index 105 cm-es fagybehatolási mélységgel jellemezhető a pályaszerkezet alatt (ez 39 cm-el több, mint a természetes talajra számított összefüggés). Az 1980-óta eltelt időszakban a 2003/2004-es tél volt a legkomolyabb, ennek fagyási indexe 181 volt, ez 86 cm-es fagybehatolási mélységgel jellemezhető a pályaszerkezet alatt (ami 36 cm-el több, mint a természetes talajra számított összefüggés). A fagybehatolási mélység

az elkövetkező 30-évben (2016-2045) a Remo klímamodell adatai szerint nem változik szignifikánsan (190-es fagyási index mellett a maximális fagybehatolási mélység a pályaszerkezet alatt 87 cm).



9. ábra: A fagybehatolási mélység változása Budapestre vonatkozóan.

A fagybehatolási mélységekre vonatkozó múltbeli trend szerint, Budapest környékére vonatkozóan, a természetes talajokban jellemző fagybehatolási mélység jellemzően évtizedenként közel 2,3 cm-el, míg a pályaszerkezet alatt közel 2,9 cm-el csökkent.

A fagybehatolási mélység esetében nem készítettünk ábrákat, hiszen az adatok csak tájékoztató jellegűek, mivel nem veszik figyelembe az egyes talajok, ill. pályaszerkezet típusok fizikai jellemzőit (pl. fizikai féleség, nedvesség stb.). A talajok hővezetési és hőtároló képességére vonatkozóan szolgáljanak iránymutatásként [6] adatai (7.táblázat **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**), aminek segítségével lehetőség nyílik a helyi jellemzők figyelembevételére.

6. táblázat: Jellemző anyagtulajdonságok a fagyás/olvadás jelenségének különböző talajoknál történő figyelembevételéhez [6]. *az aszfaltmodulus a hőmérséklet függvénye.

Anyagtulajdonság	Kavics/ Homok	Vályog (Iszap)	Agyag	Aszfalt- beton
Modulus [MPa]	138	103	69	150- 21000*
Sűrűség [kg/m ³]	1922	1442	1682	2211
Nedvességtartalom [%], természetes száraz állapot (hervadásponthoz)	3	10	20	0
Hővezető képesség, fagyott [W/m·hr·Celsius]	1,2	0,5	0,3	1,5
Hővezető képesség, nem fagyott [W/m·hr·Celsius]	1,7	0,8	0,7	1,5
Fajhő fagyott [kJ/m ³ ·Celsius]	1489	1328	1006	1878
Fajhő nem fagyott [kJ/m ³ ·Celsius]	1610	1630	1676	1878
Látens hő [MJ/m ³]	19,3	48,3	33,5	0,0

4. OLVADÁSI KÁR

Az olvadási kár a talajfagy felengedése idején a talaj túlzott elnedvesedése és ennek következtében bekövetkező teherbírás csökkenése miatt következik be (1. ábra). Az olvadási kár különösen abban az esetben veszélyes, amikor a felengedett talajréteg alatt még fagyott, így tehát közel vízzáró talajréteg található. Ha ilyen időszakban csapadékvíz jut a pályaszerkezet alá, az a fagyott talajréteg miatt elszivárogni nem tud. Az előbbiekből miatt folyós, teherbírás nélküli vagy csökkent teherbíró képességű alapréteg keletkezhet. A legutoljára felengedő talajréteg az irodalom [2] alapján durván a fagyási mélység 2/3-ában van. Ha a pályaszerkezeten nincs forgalom, az olvadási kár nem jelentkezik, a forgalom függvényében viszont igen jelentős mértékű lehet.

Az alapréteg tél végi - tavasz eleji teherbírás csökkenése akkor is bekövetkezhet, ha a külső vízutánpótlás lehetősége (pl. a csapadékból) nem áll fenn. A korábban taglaltak szerint ugyanis a fagyott, vagyis hidegebb zónában a talaj pórusaiban lévő vízpára kicsapódik. Az előbbi páramozgás általában alulról fölfelé, a fagyott zóna felé irányul és az alsóbb rétegek természetes víztartalmából származik. Alul tehát, ha nincs jelen a talajvízszint a kapilláris vízforgalom számára elérhető mélységben, kiszáradás, a felső zónában pedig elnedvesedés indul meg.

Az olvadási károk ellen alapvetően kétféleképpen lehet védekezni:

- az erre veszélyes talaj (6. táblázat) kizárásával, kiváltásával az alaprétegben;
- a vízutánpótlás kizárásával.

Mivel a vízutánpótlás teljes kizárása a pályaszerkezet teljes élettartama alatt általában nem lehetséges, ezért mind a fagyás mind az olvadás ellen fagyálló talaj, azaz fagyvédő réteg beépítésével lehet hatékonyan védekezni.

4.1. OLVADÁSI ÉS FAGYÁSI KÁR VESZÉLYE

Az olvadási és fagykár ellen tehát akkor kell védekezni, ha a talaj fagyveszélyes, illetve fagyérzékeny.

Az olvadási kár veszélye a Boromissza-féle mértezési előírás szerint akkor áll fenn, ha a következő feltételek teljesülnek egyidejűleg:

- a földmű felső 50cm-es rétegének talaja fagyveszélyes, vagy fagyérzékeny
- az utolsó 15 év becsült maximális talajvízszintje a pályaszintet legalább 2,0m-re megközelítette,
- a felszíni víz behatolásának megakadályozása céljából vízzáró padkaburkolat, vagy a forgalmi sáv külső szélétől számítva minimum 50-50 cm-el túlnyúló vízzáró alapréteg nem készült [2].

A károk megelőzése céljából a következő megoldások lehetségesek:

Fagyálló anyagból olyan vastag védőréteget kell beépíteni, hogy a következő egyenlet teljesüljön.

$$h_v = F - \sum(h_i \cdot f_i) \tag{3}$$

Ahol:

h_v : a fagyálló védőréteg vastagsága [cm];

h_i : az egyes rétegek vastagsága [cm];

f_i : az egyes pályaszerkezeti rétegek 28. táblázat szerinti komplex anyagai jellemzője, amely figyelembe veszi a pályaszerkezeti réteg hőszigetelő képességét, hajlítószilárdsági tulajdonságait és vízzáróságát;

F: az éghajlati körülményeket jellemző állandó (7. táblázat).

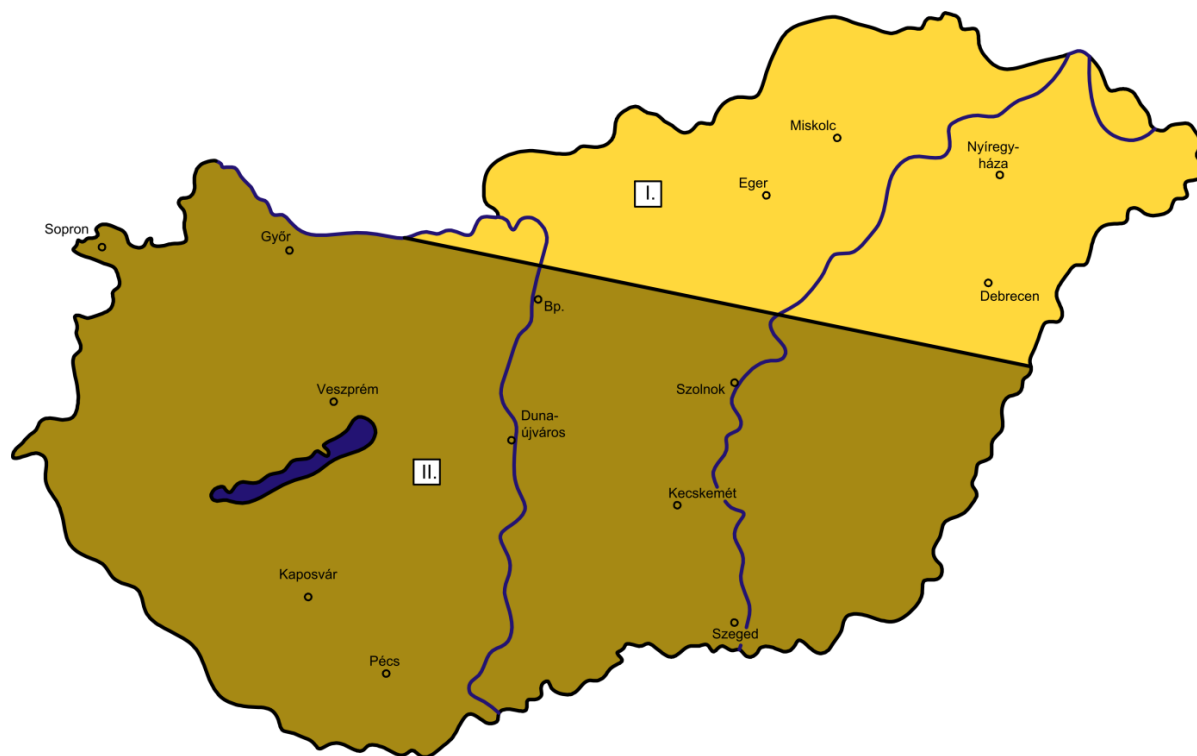
7. táblázat: Az olvadási kár megelőzése céljából szükséges pályaszerkezet vastagságok (F), [cm].

Fagy-határ-zóna	Tengerszint feletti magasság és 10. ábra	A, B és C terhelési osztály		D, E és K terhelési osztály	
		Fagyérzékeny talaj	Fagyveszélyes talaj	Fagyérzékeny talaj	Fagyveszélyes talaj
I.	A 10. ábra szerinti I. zóna	40	50	60	70
II.	Az 10. ábra szerinti II. zóna és az I.-es zóna 250m-500 m közötti területei	50	60	70	80
III.	500 m feletti területek	60	70	80	90

8. táblázat: Az f tényező értékei.

A pályaszerkezeti réteg megnevezése	f
-------------------------------------	---

Zúzottkő alapok	1,0
Mechanikai stabilizáció	1,0
Cementtel stabilizált talaj	1,1
Aszfaltmakadám	1,2
Cementtel stabilizált homokos kavics	1,3
Soványbeton alap	1,4
Betonburkolat	1,5
Aszfaltbeton, öntött aszfalt	1,5
Meleg bitumenes alap	1,5



10. ábra: Útépítési fagyhatárzónák [2]. Az első fagyhatárzónába tartozik az ország Almásneszmély-Berettyóújfalu közötti vonaltól DDNy-ra eső területek (kivéve a 250 m tengerszint feletti régiók); a II. zónába az Almásneszmély-Berettyóújfalu közötti vonaltól ÉÉK-re eső területek, valamint az I-es zóna 250m tengerszint fölötti magasságú részei; a III. fagyhatárzónába az 500 m tengerszint fölötti magasságú területek tartoznak, de ezek nincsenek feltüntetve a térképen.

A 10. ábra és a fagyási indexek területi eloszlást mutató korábbi, 5.6.7. valamint 8. ábra összehasonlításából látható, hogy a Boromissza által közölt útépítési fagyhatárzónákat elkülönítő vonal az 1951-80-as időszak 500-as fagyási index értékének megfelelő. Az 500-as fagyási indexet jelképező érték kb. 83 cm-es fagybehatolási mélységgel jellemezhető a természetes talajoknál és kb. 126 cm-es fagyási mélységgel az utak pályaszerkezete alatt. Az 1981-2010 közötti időszakban ez az 500-as fagyási indexel jelzett fagyhatárzóna már csak a Bükk fennsík, valamint a Zemplén és Aggteleki karszt magasabb részein jelentkezik, a jövőben pedig már sehol nem lesz jellemző hazánkban. Az előbbieket szerint érdemes átgondolni a 7. táblázat jellemző pályaszerkezet vastagságait és a megfelelő mértékben csökkenteni azokat. A jövőben a korábbi (1951-1980) 500-as fagyási határ földrajzi környezete inkább a 250-es fagyási indexel (kb. 56 cm-es fagybehatolási mélység a természetes talajoknál és kb. 96 cm-es fagyási mélységgel az utak pályaszerkezete alatt) lesz jellemezhető.

4.2. OLVADÁSI KÁRT INDUKÁLÓ TALAJNEDVESSÉG VÁLTOZÁS

A fagybehatolási mélység ismerete mellett fontos a fagyott talajrétegek részleges vagy teljes felengedése, felolvadása esetén, a földműben jelentkező teherbírás csökkenés. A jelenség a magas talajnedvesség növekedése vagy másként fogalmazva a földmű víztartalmának (a porusokban lévő víz

pórusnyomásának) egy határon túli növekedése formájában jelentkezik és a méretezés szempontjából számszerűen pl. a földmű modulus csökkenésében jelentkezik.

A talajnedvességek meghatározása egy Thornthwaite-féle [15] havi vízmérleg modellel történt. A modellszámítás a felső, kb. 1m-es talajréteg nedvességtartalmát mutatja egy relatív skálán, amely tulajdonképpen a szántóföldi vízkapacitás és a hervadásponti víztartalom közötti tartományban számít. Az előbbi ún. talajnedvesség érték tehát a kapilláris pórusok telítettségére utaló szám. Ha értéke zérushoz közeli, akkor a talaj (a növényi vízfelvétel szempontjából) teljesen száraznak tekinthető, ha 100 körüli az értéke, akkor pedig már a bármilyen plusz többletvíz a gravitációs pórusokat kezdi telíteni.

Az ország egészét tekintve a tavaszi időszakban átlagosan 49%-os a kapilláris pórusok telítettsége, ami 100% és 27% minimális és maximális érték között oszlik el, átlagosan 11,8-es területi szóródással. A régiók szerinti megoszlást az **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** 9. táblázat mutatja.

9. táblázat: A talajnedvesség relatív értékeinek megoszlása a magyarországi régiókban (1981-2010).

Régió	Min (%)	Max (%)	Átlag (%)	Szórás
Dunántúl (D)	30	57	41	6,64
Budapest és környéke (BK)	27	86	46	12,19
Dél-Alföld (EA)	28	59	46	7,04
Észak-Magyarország (EM)	42	100	60	13,74
Nyugat-Dunántúl (NYD)	31	72	45	9,44
Közép-Dunántúl (KD)	30	78	47	12,35
Észak-Alföld (EA)	42	73	55	9,12

A szántóföldi vízkapacitás közeli értékekkel rendelkező területek a magasabb talajnedvességűek, tehát a földmű teherbíró képessége szempontjából veszélyeztetettebbek a tavaszi időszakban. Az előbbieket szerint az Északi Középhegység, ill. az Alföld ÉK-i része, valamint a Nyugat-Dunántúl határközeli területei, itt is elsősorban az Őrség és a D-NY zalai területek. Ezek a kritikus helyek a téli csapadékösszeget mutató térképen is. Ott a legkedvezőtlenebb a helyzet, ahol a magas tavaszi talajnedvesség kedvezőtlen talajfizikai féleségekkel iszapos-agyagos talajok is kombinálódnak.

A talajnedvességek alakulása a Thornthwaite-féle havi vízmérleg modell alapján a múltban a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** alapján jellemezhető.

Az ország egészét tekintve a tavaszi időszakban egy átlagosan 71%-os a kapilláris pórusok telítettsége (az 1981-2010-es időszakban 49%), ami 100% és 54% minimális és maximális érték között oszlik el (az 1981-2010-es időszakban 100% és 27%), átlagosan 11,4-es területi szóródással (az 1981-2010: 11,8%). A régiók szerinti megoszlást a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** mutatja.

10. táblázat: A talajnedvesség relatív értékeinek megoszlása a magyarországi régiókban (1951-1980).

Régió	Min. [%]	Max. [%]	Átlag [%]	Szórás
D	61	98	78	9,70
BK	54	98	64	10,45
DA	55	77	62	3,70
EM	57	100	79	13,42
NYD	61	100	75	12,23
KD	59	100	70	8,00
EA	57	88	68	8,01

A szántóföldi vízkapacitás közeli értékekkel rendelkező területek a magasabb talajnedvességűek, tehát a földmű teherbíró képessége szempontjából veszélyeztetettebbek. Az előbbieket szerint a

hegyvidéki részeken kívül az alföld ÉK-i része, valamint a Dél-Nyugat-Dunántúl területei, az Őrség, a Mura és a Dráva menti területek.

A múlthoz (1951-80) képest tehát a tavaszi kapilláris telítettséget jellemző talajnedvesség készlet jelentősen, mintegy 22%-al csökkent. A csökkenés a Dél-Dunántúlon, a Dunántúl keleti területeinek középső részén, valamint a Kisalföld középső és dél-nyugati részén a legjelentősebb.

A talajnedvességek alakulását a jövőben a 11. táblázat alapján jellemezhető.

Az ország egészét tekintve a tavaszi időszakban egy átlagosan 34%-os a kapilláris pórusok telítettsége (az 1981-2010-es időszakban 49%), ami 82% és 7 % maximális és minimális érték között oszlik el (az 1981-2010-es időszakban 100% és 27%), átlagosan 12,2-es területi szóródással (az 1981-2010-es időszakban 11,8). A régiók szerinti megoszlást a 11. táblázat mutatja.

11. táblázat: A tavaszi talajnedvességek térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (2016-2045).

Régió	Min. [%]	Max. [%]	Átlag [%]	Szórás
BK	10	66	28	11,85
D	10	46	27	9,03
DA	9	49	34	9,92
EA	16	65	38	9,79
EM	7	82	40	15,57
KD	11	62	30	12,63
NYD	17	60	35	10,73

A szántóföldi vízkapacitás közeli értékekkel rendelkező területek a magasabb talajnedvességűek, tehát a földmű teherbíró képessége szempontjából veszélyeztetettebbek. A 11. táblázat adatai szerint a jövőben szinte kizárólag az Északi-Középhegység magasabb területei lesznek tavasszal átlagosan magasabb talajnedvességűek.

A jelenhez (1980-2010) képest tehát a tavaszi kapilláris telítettséget jellemző talajnedvesség-készlet jelentős, mintegy 15%-os csökkenése feltételezhető majd.

A földmű modulusra vonatkozóan több irodalom dolgoz ki összefüggéseket, általában a talajok fizikai jellemzői alapján: a három fő irányban a nyomófeszültségek, a plasztikus index, talajalkotók (homok, iszap, agyag arányai), folyási határ, valamint az aktuális talajnedvesség. A CBR mérésekkel átlagában jól korreláltható a földmű modulusza, de sajnos ez is talajtípusfüggő. A szemcsés és a kohéziós talajokra általában külön egyenletek kidolgozottak [10]. Például szolgáljon [7] által kidolgozott összefüggés:

Szemcsés talajok:

$$\log(M_r) = 0,5230,0225 \cdot w + 0,544 \cdot \log(\sigma) + 0,173 \cdot SM + 0,197 \cdot GR \quad (4)$$

Ahol:

M_r : a földmű modulusa [ksi, 1MPa=0,15ksi];

w: víztartalom [%];

σ : összes feszültség [psi, 1 psi = 6,89 kPa];

SM: iszap faktor (ha a talaj iszap fizikai féleségű SM=1, különben 0);

GR: kavics faktor (ha a talaj kavicsos (kavics, kavicsos iszap, kavicsos agyag) akkor GM=1, különben 0).

Kohéziós talajok:

$$M_r = 37,431 - 0,4566 \cdot PI - 0,6179 \cdot w - 0,1424 \cdot P_{200} + 0,1791 \cdot \sigma_3 - 0,3248 \cdot \sigma_d + 36,722 \cdot CH + 17,097 \cdot MH \quad (5)$$

Ahol a korábban nem szereplő paramétereken felül:

PI : plasztikus index [%];

P₂₀₀: a 200-as (0.075 mm) szitán keresztülhulló anyagmennyiség [%];

σ₃: z irányú főfeszültség[psi];

σ_d: hatékony feszültség[psi];

CH: 1 a nagy plaszticitású agyagokra, különben 0 (iszap, iszapos agyag, alacsony plaszticitású agyag);

MH: 1 a nagy plaszticitású iszapokra, különben 0 (nagy plaszticitású agyag, iszap, iszapos agyag).

Ha a talajnedvesség adat nem áll rendelkezésünkre, akkor a földmű modulus magasabb talajnedvesség következtében előálló korrekciójára (olvadás miatt csökkenő voltára) egy az adott talajfizikai jellemzőknek megfelelő korrekciós faktor (R) megadását javasolja a nemzetközi szakirodalom. A R faktor az anyag fagyás-olvasással szembeni érzékenységet mutatja és [16] szerint a következőképpen kalkulálható:

$$R = 1 - (1 - R_0) \cdot \exp(A \cdot U_t) \quad (6)$$

Ahol:

R₀: a korrekciós faktor (R) minimális értéke a mértékadó (legkedvezőtlenebb) tavaszi olvadási időszakban;

U_t: az eltelt hetek száma a mértékadó olvadási időszak óta;

A: a változás rohamosságának a mértékét mutató negatív konstans, amely a földmű szezonális kiszáradási folyamat gyorsaságát mutatja.

[4] a földmű modulusokra is vonatkozó havi értékek eloszlását mutató táblázatot közöl. A táblázatban a földműmodulusokra a téli hónapokban (december-február) egy 80 MPa-os, a tavaszi hónapokban márciusban-áprilisban egy 30 MPa-os, májusban pedig egy 40 MPa-os értéket ad meg (a többi hónap földműmodulusa 50 MPa értékkel föltüntetett). A táblázat kidolgozása valószínűleg az 1951-80-as időszak meteorológiai adatait alapul véve történt, azóta viszont, ahogy említettük, a tavaszi talajnedvességek csökkenése következett be mintegy 22%-os relatív értékkel. Ez a jelenség és a jövőben prognosztizálható további csökkenés (a REMO modell előrejelzése alapján további 15%-os átlagos csökkenés valószínűsíthető tavasszal) következtében a földmű teherbírásának növekedése várható a tavaszi hónapokban, azon belül is különösen a tavasz végén.

A tél végén a hőmérsékletek növekedése (közel 2 °C-os a havi átlaghőmérséklet növekedés februárban, a növekedés az 1951-80-as időszak és a 2015-2045-ös előre jelzett periódus között jelentkezett) és a 0 °C alatti hőmérsékletű napok számának csökkenése (körülbelül 4,4 napos csökkenés februárban 11,8-ról 7,4 napra az 1951-80-as időszak és a 2015-2045-ös előrejelzett periódus között) erőteljes. Az előbbieket alapján valószínűsíthető, hogy az olvadási kárral leginkább veszélyeztetett időszak korábbra tolódik és a február hónapra egy lényegesen alacsonyabb földmű modulus valószínűsíthető. A májusra viszont a szárazodás és magasabb hőmérsékletek miatt valószínűleg növekvő földmű modulus lesz jellemző. Az előbbieket szerint a [4] által közölt táblázat a következők szerint módosulhat (9. táblázat).

12. táblázat: A földmű modulusok lehetséges megoszlása a jelenben és a jövőben [4] megközelítését alapul véve.

Hónapok	Földmű modulus [4] [MPa]	Földmű modulusok a jövőben (lehetséges változás) [MPa]
Jan.	80	80
Febr.	80	30
Már.	30	30
Ápr.	30	40
Máj.	40	50
Jún.	50	50
Júl.	50	50
Aug.	50	50
Szept.	50	50
Okt.	50	50
Nov.	50	50
Dec.	80	80

A földmű modulusára vonatkozóan a Svéd szabályozás a tavaszi olvadási, kritikus időszakokra a nyári érték 35%-át adja, míg a Dán szabályozás a 60%-át. Az olvadást követő tavaszi periódusra, már kevésbé átáztatott földműre vonatkozóan, a nyári modulus százalékában a Svéd előírások szerint 50%, míg a Dán szabályozás révén 80%-os érték vehető figyelembe [8]. A hazai előírás a Dán arányokhoz áll közelebb.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A környezeti jellemzők, mint a hőmérséklet, csapadék, légnedvesség, fagyás-olvadás ciklusok és a talajvíz mélysége jelentős hatással vannak az útburkolatok állapotára, élettartamára, ezért a pályaszerkezetek méretezésénél is fontos tényezőként vehetők figyelembe.

A klímaváltozás a megváltozó környezeti jellemzők miatt a pályaszerkezetek tervezési paramétereinek, esetleg magának a tervezési elveknek a módosítását indukálja.

A fagyási indexek országos átlaga tekintetében az 1951-80-as időszakban 404 Celsius nap, az 1981-2010-es időszakban a fagyási indexek országos területi átlaga már csak 245 Celsius nap, tehát a két egymást követő 30-éves periódusban a fagyási indexek országos átlaga közel 160-as értékkel csökkent, bár a térségi szóródás azonban jelentősen nőtt. A REMO modell előrejelzései szerint, a jövőre vonatkozóan a fagyási indexek országosan kismértékben tovább csökkennek (245 Celsius napról) 221-es értékre. Az országos eloszlás a klímamodellel szerint kissé módosul.

A tél végén a hőmérsékletek növekedése (közel 2 °C-os a havi átlaghőmérséklet növekedés februárban, az 1951-80-as és a 2015-2045-ös között) és a 0 °C alatti hőmérsékletű napok számának csökkenése (~ 4,4 napos csökkenés februárban 1951-80-as és a 2015-2045-ös időszak között) erőteljes.

1951-80-as időszakhoz képest a tavaszi talajnedvességek csökkenése következett be, mintegy 22%-os relatív értékkel. A jövőben további csökkenés várható (a REMO modell: ~15%-os átlagos csökkenés valószínűsíthető tavasszal)

Az előbbiekből alapján valószínűsíthető, hogy az olvadási kárral leginkább veszélyeztetett időszak korábbra tolódik és a február hónapra egy lényegesen alacsonyabb földmű modulus, májusra azonban a szárazodás és magasabb hőmérsékletek miatt valószínűleg növekvő földmű modulus lesz jellemző.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS:

A publikáció az Agrárminisztérium támogatásával készült.

7. IRODALOMJEGYZÉK

[1]: Bartholy, J., Bozó L. & Haszpra L. (szerk.) 2011: Klímaváltozás – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. Magyar Tudományos Akadémia és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke, Budapest, p. 281.

- [2]: Boromissza, T. 1997: Méretezési Praktikum, Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezési gyakorlata, Közúti közlekedési füzetek 16, Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium, Budapest, p. 82.
- [3]: Boromissza, T., Detre, Gy., Lazányi, I. & Szalai, S. 2007: Az útépitési fagyhatárzónák pontosítása. Közúti és mélyépitési szemle, 6. szám: 16-21.
- [4]: Fi, I., Boncs, P., Pethő, L. & Tóth, Cs. 2012: Útburkolatok méretezése. Terc Kft. ISBN 978 963 9968 349, p. 457.
- [5]: Berggren, W. P. (1943): Prediction of temperature-distribution in frozen soils. Transactions - American Geophysical Union 24(3): 71-77. <https://doi.org/10.1029/TR024i003p00071>
- [6]: Bosscher, P. J., Jong, D. T. and Benson, C. H. (1998): International Conference on Cold Regions Engineering, 9th, Duluth, MN, Sep. 27-30, 1998. Proceedings. Cold regions impact on civil works. Edited by D.E. Newcomb. Publisher: Reston, VA, American Society of Civil Engineers (ASCE). United States.: 731-747.
- [7]: Carmichael, R.F. III & Stuart, E. 1985: Predicting Resilient Modulus: A Study to Determine the Mechanical Properties of Subgrade Soils. "Transportation Research Record TRR 1043, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
- [8]: Dawson, A. (2009). Water in Road Structures (Movement, Drainage and Effects), Spring Science + Business Media B.V. 2009. ISBN: 978-1-4020-8561-1, p. 436.
- [9]: Gáspár, L. (1959): Az útépitési fagyhatár megállapítása léghőmérsékleti adatokból. Mélyépitéstudományi szemle. IX. évf. 10. szám: 472-480.
- [10]: George, K. P. (2004): Prediction of resilient modulus from soil index properties. Final Report. University of Mississippi. p. 72.
- [11]: Gupta, A. 2014: A review of Environmental Factors on Flexible Pavement Modelling, Modern Traffic and Transportation Engineering Research, vol:3 iss:1 pg:14-20
- [12]: Gribovszki, Z., Kalicz, P., Herceg, A. & Primusz, P. 2020: A klimatikus jellemzők hatásai az útpályaszerkezetre, Útügyi Lapok, <https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.01>
- [13]: Herceg, A., Primusz, P., Kalicz, P. & Gribovszki, Z. 2020: A klimatikus jellemzők hatásai az útpályaszerkezetre: A pályaszerkezet hőmérsékletének számítása, Útügyi Lapok, <https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.02>
- [14]: Radcliffe, D. E., Simunek, J. 2010: Soil Physics with HYDRUS: Modeling and Applications, CRC Press, ISBN 9781420073805, p. 388
- [15]: Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R. (1955): The waterbalance. Philadelphia, PA: Drexel Institute of technology, climatological laboratory publication 8.
- [16]: Ullidtz, P. (1998): Modelling Flexible Pavement Response and Performance. Tech Univ. of Denmark Polyteknisk, ISBN: 978-8750208051, p. 205.