



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék



MŰEGYETEM 1782

## **A Paksi Atomerőmű Zrt. területén létesítendő új blokkok hűtési lehetőségeinek felülvizsgálata**



Somlyódy L. – témavezető,  
Buzás K., Jászay T., Karches T., Kardos M., Nováky B. és Ujhelyi G. – közreműködők

MVM Lévai Projekt azonosító: 5306 03A00016 YYA

Budapest, 2011. november 11.



# VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

## 1. Bevezetés

A Paksi Atomerőmű Zrt. 2010-ben döntés-előkészítő tanulmány (továbbiakban Tanulmány) készítésével bízta meg a GEA EGI Zrt. által vezetett konzorciumot, azzal a céllal, hogy tegyen javaslatot a létesítendő új erőmű blokkok (2 x 1200 vagy 2 x 1600 MW) hűtési megoldására. A Tanulmány célja, hogy két fázisban feltárja a tervezett bővítés hűtési lehetőségeit és ezek közül a legkedvezőbb *frissvízhűtéses vagy hűtőtornyos* műszaki megoldást válassza ki, figyelembe véve az energetikai, a gazdaságossági, az üzemeltetési, a környezeti, vízhasználati, biztonsági és egyéb szempontokat, továbbá a törvényi/hatósági előírásokat.

Az MVM Zrt. (Megbízó) és a Paksi Atomerőmű Zrt. 2011-ben szükségét látta a rendkívül szerteágazó munka független felülvizsgálatának, tekintettel a meghozandó döntés nagy horderejére és hosszú távú hatására. Ennek elvégzésére a BME VKKT-t kérték fel. A munka célja a megoldások műszaki, gazdasági és környezeti szempontú felülvizsgálata és javaslat tétel az esetleges módosításokra.

A főbb részfeladatok az alábbiak:

- Az elkészített Tanulmányok kritikai értékelése.
- Módszertan kidolgozása a felülvizsgálat elvégzésére, figyelembe véve a vizsgált hűtési változatokat és az értékelés szempontjait.
- Termodinamikai, hidraulikai és gazdasági számítások a megtermelt energia változására, a környezeti tényezők függvényében (lég- és vízhőmérséklet, vízhozam, relatív páratartalom), nedves hűtőtornyos és frissvízhűtésű változatokra. Hidrodinamikai és hő-transzport számítások az 500 m-es szelvényben kialakuló maximális hőmérséklet becslésére a vízhozam, a hő-lépcső és a kivett víz hozama függvényében. Felmelegedett hűtővíz visszavezetés diffúzorok segítségével.
- Az éghajlati hatások statisztikai becslése, különös tekintettel a vízhozam, és a vízhőmérséklet, valamint a léghőmérséklet lehetséges változásaira.
- A különböző változatok környezeti hatásainak minőségi értékelése.
- A jelenlegi és a lehetséges jövőbeni vízi környezeti előírások és azok figyelembe vétele az értékelések során.
- A beruházási és üzemelési költségek ellenőrzése irodalmi adatok, mérnöki becslések, modellszámítások stb. alapján.
- A változatok átfogó értékelése. Bizonytalanságok és rangsorolások.
- Javaslatok további elemzésekre.

Az értékeléseket részletesen egy-egy frissvízhűtésű illetve természetes huzatú nedves hűtőtornyra végeztük el (FVR és THNH, 2x1200 MW,  $\Delta T = 11$  °). [REDACTED]

[REDACTED]

## 2. Módszertan

A feladatok összetett és hierarchikus jellegének megfelelően - jövőképünk felvázolását követően - a dekompozícióról és aggregációról alapuló módszert alkalmaztuk. Ennek lényege, hogy a problémát jól kezelhető részekre bontjuk, ezeket behatóan elemezzük, majd az

eredményeket a döntési probléma indikátorait levezetve, magasabb szinten aggregáljuk (például az órás léptéken szimulált energiatermelésből több éves átlagot képezünk). Ennek keretében az éghajlatváltozás jövőbeni potenciális hatásait globális és regionális modellekkel vettük figyelembe. Ezekhez illesztettünk az analógia elvén alapuló modellt, ami a múltbeli észlelések (15 - 37 év) statisztikai elemzésén és leválogatásán alapul. Így állítottunk elő jövőbeni prognózisokat a Duna háttér-hőmérsékletére és annak tartósságára.

A THNH és FVR változatokra üzemelési szimulációs modelleket fejlesztettünk, eltérő éghajlati hatásokkal. Többek között, órás adatok alapján számítottuk a THNH hosszú-távú átlagos kicső energiáját, az FVR változatra pedig a turbina jelleggörbe szerepét. A villamos energiatermelés számításai, figyelembe véve frissvízhűtésre a környezeti előírásokat, vezetnek az üzemelési költség fontos összetevőire. Ilyen például az energiacsökkenés, az önfogyasztás és a vízigény. A beruházási költségek becslését több lépésben végeztük el. Hasznosítottuk a nemzetközi irodalom adatait (MIT és EPA), megvalósult projektek jellemzőit, és tételes „beköltséget” is végeztünk.

A jövőt nagymértékben befolyásolja a környezeti szabályozás. Erre előrejelzés aligha adható, legfeljebb a nemzetközi (elsősorban az EU és az USA) helyzetkép elemezhető. Alapvető kérdés annak a vizsgálata is, hogy különböző bevezetések (diffúzorral vagy anélkül) esetében a Dunában az elkeveredés és a lehülés hogyan játszódik le és milyen mértékű lesz. Erre a célra 3D hidrodinamikai és hő-transzport modellt, majd ezekre illesztett, gyors, analitikus 2D modellt alkalmaztunk. A részletes számítások birtokában csupán az 500 m szelvény legnagyobb hőmérsékleti értékeit őriztük meg (a jelenlegi korlát erre vonatkozik), és ezekhez rendeltük a bevezetések beruházási költségeit.

A műszaki-gazdasági elemzések a medermélyülési és egyéb hatásokkal együtt az életciklus számítás alapján értékelhetők. Ezt követően veendők figyelembe a további, jövőben változó kockázati vagy bizonytalansági tényezők. Ezeknek egy része nem számszerűsíthető és csupán minőségi értékelés adható. A végeredmény a több-szemponjú elemzés valamilyen rangsora, nem kizárva két közel egyenértékű variáns megjelenését sem. Ilyen esetben további vizsgálódások és a döntéshozók preferenciáinak figyelembe vétele szükséges a kiválasztás elvégzéséhez. Erre a célra korszerű döntéstámogató rendszer alkalmazása célszerű.

### 3. Eredmények

#### 3.1 A Tanulmány kritikai értékelése

Észrevételeinket három csoportba soroltuk: általános, specifikus és olyan felvetések, amelyekre a válasz csak a később elvégzett részletes elemzések alapján adható. A megjegyzések elsődleges célja a feltett döntési kérdés megalapozott megválaszolásának elősegítése. Ennek megfelelően itt csupán a fontosabb megállapításokat foglaljuk össze.

- A konzorcium szerteágazó, nagy volumenű, nehéz munkát végzett, amelyet tanulmány sorozat foglal össze. Ez kiterjed hőtechnikai, energetikai, gazdasági, környezeti, technológiai és egyéb kérdésekre. ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■
- ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■

- [REDACTED]  
[REDACTED]
- [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]
- [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]
- [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]
- [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]
- [REDACTED]  
[REDACTED]
- [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]
- [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]
- Összefoglalóan, a GEA/EGI Tanulmány egy nagy horderejű projekt hosszabb tervezési és megvalósítási folyamatának fontos kezdeti lépését tette meg, a kritikai észrevételek ellenére sok hasznos eredményt és a felülvizsgálat által is igazolt következtetést szolgáltatva.

### 3.2 Az éghajlatváltozás hatásai

- A térség számos meteorológiai és vízrajzi jellemzője emelkedő trendet mutat, ami azt sugallja, hogy már részesei vagyunk a változásnak.
- A vízhőmérséklet tartóssági görbéket a várható melegedés 0 – 2.5 °C tartományában 0,5 °C lépcsőben állítottuk elő. A görbék a jelenlegi éghajlatot jellemző állapottól (például 22 °C átlagos tartóssága 20 nap körüli) jobbra mozdulnak el, annál nagyobb mértékben, minél nagyobb a melegedés (a 2030-ra várható + 1.5 °C-hoz 30-35 nap növekedés tartozik). Az analógia módszerén alapuló becslés megbízhatósága csökken a küszöbérték emelkedésével és a melegedés fokozódásával.

---

<sup>1</sup> [REDACTED]

- A jelen éghajlati állapotra a rövid minta szerint észlelt legnagyobb évi maximum 25.4 °C nagyjából 100 évente egyszer fordul elő<sup>2</sup> (1%-os meghaladási valószínűségű). Az éghajlat 1.5 °C melegezése esetén a 100 éves gyakoriságú évi maximális víz hőmérséklet 25.4 °C-ról 27.0 °C-ra emelkedhet. Kisebbs valószínűséggel a maximális víz hőmérséklet ennél nagyobb mértékű, akár 28-29 °C-ra történő növekedése sem zárható ki. A szélsőségek tartóssága a maximum környezetében - a meglévő ismeretek alapján - nem becsülhető.
- A kis vízhozamok ( $Q < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) - kedvezően - nem esnek egybe a dunai hőmérsékleti csúcsokkal; míg a hőmérséklet maximuma nyári hónapokban várható, addig a Duna vízhozam minimumok kora ősszel jelentkeznek.

### 3.3 Környezeti hatások

A frissvízhűtésű és tornyos hűtések minőségi összevetése alapján a következő megállapítások tehetők:

- Az FVR és THNH változatok egyaránt számos környezeti hatással rendelkeznek, de az irodalom „drámai” esetekről nem számol be.
- A frissvízhűtésű rendszerek sokkal több vizet mozgatnak meg, mint a tornyos megoldások és ezzel függenek össze a potenciálisan komoly vízkivételi-, hő- és vízminőségi hatások, amelyeket a nagy hígulás a legtöbb esetben (Paks esetében is) mérsékel. Ugyanakkor a tízed akkora víz igényű nedves hűtőtornyok víz felhasználása párolgás révén kétszerese az FVR-nek. A többi hatás közül negatívként a hűtőtornyokban alkalmazott biocidok és a nem párolgó bedúsult anyagok emelendők ki, amelyek lehomlási (felezési) ideje roppant eltérő lehet (ma már csak engedélyezett összetételű biocidok alkalmazhatók). Aggodalmak a hosszú távú hatással kapcsolatban jelentkeznek.
- A THNH megoldás további jellemzője a partikulált anyagok potenciális kibocsátása a légkörbe, a nagy lábnyom, a zaj-, és az esztétikai hatás (200 méter magas műtárgyakról van szó), ami csökkenti a rekreációs- és tájkép értéket. A vízgőzcsőva többlethatást okozhat és ködhatással bírhat, lefagyást eredményezhet. A japán balesetet követően kiemelt, vizsgálendő kérdés a földrengésbiztonság.
- Figyelemre méltó, hogy amíg az előbb említett szempontok többsége alapján a THNH változat tűnik kedvezőbbnek, addig az utóbb felsorolt - túlnyomóan kisebb jelentőségű - hatások kicsinyek vagy nem relevánsak az FVR rendszerekre és ezért ezek lehetnek előnyösebbek.

### 3.4 Környezeti szabályozók

- A megengedhető maximális hőmérséklet(ek) szabályozásának potenciális jövőbeni változása jelenti az egyik legnagyobb bizonytalansági tényezőt, ami az FVR hűtési változatok megítélését alapvetően befolyásolja. A bemutatott trendek alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:
- A hőmérsékleti korlátok - nagy bizonyossággal - nem válnak megengedőbbeké.

<sup>2</sup> A múltban a legnagyobb maximális víz hőmérsékletet, 26.6 °C-ot 2006-ban észlelték. Ez a jelen éghajlatot az IPCC konvenció szerint jellemző 1974–1990. időszakon kívül van (azaz a jövőt képviseli), gyakorisága pedig 1000 és 10000 év közötti.

- Az UK példához hasonlóan valószínű az igazodás az EU VKI jó állapot osztályozásához, ami itthon még kimunkálásra vár (az Alkotmány Bíróság által felfüggesztett VGT javaslat legfeljebb háttéranyagul szolgál majd).
- [REDACTED]
- A felső korlát  $T_{\max} = 28 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$  lehet, a hőlépcsőre pedig nyáron  $\Delta T_{\max} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$  (télen magasabb érték) vonatkozhat;
- A csóvára vonatkozó előírás függvénye a  $T_{\max}$  meghatározásának;
- A legfontosabb és meghatározó  $T_{\max}$  helyének előírása. Ez lehet a kilépő szelvény, a befogadó, a csóva, a + 500 m szelvény stb. Napjainkban az EU VKI által képviselt tendencia és más országok gyakorlata határozott elmozdulást jelent a befogadó határértékek irányába.

### 3.5 Elkeveredés és bevezetési változatok

A részletes hidrodinamikai és hőtechnikai számítások alapján az alábbi megállapítások tehetők.

- A jelenlegi kiépítettség és parti bevezetés mellett elegendő a természetes elkeveredés hatása. A bővítés eredményeként a meleg víz mennyisége akár a  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  értéket is meghaladhatja, amennyiben a meglévő blokkok is működésben maradnak. A klímaváltozás hatására is emelkedhet a Duna-víz hőmérséklete. Ezek együttesen szükségessé teszik intenzív és költség-hatékony bekeverési módokat kialakítását.
- A reális megoldást a hűtővíz három ponton történő, megfelelő kiosztású bevezetése jelenti diffúzor segítségével. Amennyiben csak az új blokkok működnek, a jelenlegi korlát a + 500 m szelvényben - biztonságot is figyelembe véve – mintegy  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  háttér hőmérsékletig tartható. Ha a meglévő blokkok is üzemben maradnak, a megengedhető Duna-víz hőmérséklet  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra csökken<sup>3</sup>. Ez, az éghajlatváltozás hatását figyelembe véve, hosszabb távon nem feltétlenül tartható (hacsak több, egymás alatti bevezetést vagy esetleg „multi-port” diffúzoros megoldást nem alkalmaznak).

### 3.6 Beruházási költségek

Az elvégzett négy lépésből álló elemzés alapján a beruházási költségekre az alábbi megállapítások tehetők:

- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]

<sup>3</sup>  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  biztonsági tartalék mellett

- [REDACTED]
- [REDACTED]

### 3.7 Üzemelési és élelciklus költségek

- Az élelciklus elemzés valójában olyan mérnök-gazdasági konvenció alkalmazását jelenti, ami lehetővé teszi az évente visszatérően jelentkező költségek és az egyszeri beruházási költség kombinálását. Az eredmény számottevően függ az élettartam és a diszkonttényező megválasztásától, így az óvatosan kezelendő. Hasonló módszer az évi összköltség számítása. Míg előbbi igen nagy - talán túlzott - hangsúlyt fektet az üzemelési költségre, az ÉÖK-nál fordított a helyzet.

- [REDACTED]

- [REDACTED]

- [REDACTED]

- A dunai medermélyülés megfigyelt jelenség. Hatvan év adatait elemezve és az elmúlt húsz év trendjének fennmaradását feltételezve készítettünk jövőbeni prognózist. E szerint a 2030-as évekre várható 175 cm-es átlagos éves dunai vízállásnál az átemelők ünfogyasztása és költsége - változatlan villamos-energia egységár mellett - csak kismértékben nő.

### 3.8 Több-szemponitú elemzés

A jövőre vonatkozó értékelés szerteágazó szempontjai/hatásai magukba foglalták a (i) költségeket; (ii) az energia, továbbá a víz árát; (iii) üzemviteli tulajdonságokat; (iv) a

<sup>4</sup> Integrált Szennyezés Megelőzés és Szabályozás, Legjobb Rendelkezésre álló Technológia.



mederváltozást; (v) az esetleges dunai visszaduzzasztást; (vi) az éghajlatváltozást; (vii) az elkeveredést és a potenciális visszaterhelést; (viii) a környezeti hatásokat és (ix) a környezeti szabályozás lehetséges jövőbeni változását. Az elvégzett elemzés alapján - figyelembe véve az előnyöket, a hátrányokat és a bizonytalanságokat - az alábbi összefoglaló értékelés adható.

- [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] Ugyanakkor az FVR javára írandó a kisebb érzékenység a hőmérséklet gyors ingadozásaira (iii).

[REDACTED]

[REDACTED]

Költség Változat	THNH		FVR		FVRUV
	EGI [m Ft]	VKKT [m Ft]	EGI [m Ft]	VKKT [m Ft]	EGI [m Ft]
Beruházási költség	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
OMR költség/év	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
ÉcK	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

1. táblázat: A beruházási, OMR és ÉcK költségek összehasonlítása a három alternatívára

- Az (v) – (ix) szempontok a látszólag egyszerű összképet alaposan összekuszálják. A THNH vonatkozásában csupán egyetlen kismértékű, negatív hatás jelentkezik (éghajlatváltozás), a többi gyakorlatilag nem releváns. Ezzel szemben az FVR esetében egymással összefüggésben jelenik meg számos nehezen kiszámítható hatás. Ezek döntően alakíthatják a leendő hőterhelési korlátok betarthatóságát és több vízminőségi, ökológiai következménnyel is járhatnak.

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]
- Második közelítésben azt vizsgáltuk, hogyan és mennyiért mérsékelhetők a bizonytalanságok.

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] Három eszközzel élhetünk: visszaterhelés alkalmazása, alacsonyabb hőlépcső választása és hűtővíz átvezetése a melegvíz-csatornába.

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

<sup>5</sup> Ezt némileg növeli a leiszapolási víz kezelési költsége.



## TARTALOM

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ .....	I
1. Bevezetés.....	i
2. Módszertan .....	i
3. Eredmények.....	ii
3.1 A Tanulmány kritikai értékelése .....	ii
3.2 Az éghajlatváltozás hatásai .....	iii
3.3 Környezeti hatások.....	iv
3.4 Környezeti szabályozók .....	iv
3.5 Elkeveredés és bevezetési változatok.....	v
3.6 Beruházási költségek.....	v
3.7 Üzemelési és életciklus költségek .....	vi
3.8 Több-szemponjú elemzés.....	vi
3.9 Javasolt vizsgálatok.....	viii
1. BEVEZETÉS .....	1
2. EGI/GEA ELŐZETES MEGVALÓSÍTHATÓSÁGI TANULMÁNY: KRITIKAI ÉSZREVÉTELEK.....	3
2.1 Általános rész .....	3
2.2 Specifikus megállapítások és kérdések .....	4
2.3 Elemzéseket igénylő kérdések.....	5
3. MÓDSZERTAN.....	7
4. AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS HATÁSA.....	11
4.1 Bevezetés.....	11
4.2 Rendelkezésre álló adatok és módszertan .....	11
4.3 Tartóssági vizsgálat .....	13
4.4 Az évi tartósság időbeli alakulása .....	15
4.5 Hazai éghajlati forgatókönyvek.....	18
4.6 Jelenlegi éghajlat (bázis időszak).....	20
4.7 Éghajlati forgatókönyvek a vizsgált térségben.....	21
4.8 A vízhőmérséklet tartósságában várható változások.....	23
4.9 Az évi maximális vízhőmérséklet és várható alakulása éghajlatváltozás esetén .....	25
4.10 Vízhőmérséklet és vízhozam.....	28
5. KÖRNYEZETI HATÁSOK ÉS SZABÁLYOZÁSOK .....	33
5.1 Az FVR rendszerek környezeti hatásai .....	33
5.2 A környezeti hatások összehasonlítása .....	35
5.3 Hűtővíz-kivételi művek jogi szabályozásának története az USA-ban .....	36
5.4 Határértékek nemzetközi áttekintése.....	37
5.4.1 USA.....	38
5.4.2 Hollandia .....	38
5.4.3 EC Freswater Fish Directive (FFD, 78/659/EEC) .....	39
5.4.4 Európa .....	39
5.4.5 Javasolt VKI hőmérsékleti határértékek az Egyesült Királyságban.....	39
5.5 A jövő lehetséges előírásai .....	40
6. AZ ELKEVEREDÉS, ÉS A BEVEZETÉSI VÁLTOZATOK VIZSGÁLATA.....	41
6.1 Bevezetés.....	41
6.2 Módszertan .....	41
6.3 A felmelegedett hűtővíz elkeveredése.....	42
6.4 Intenzív bekeverés.....	46

6.5	Összefoglalás.....	50
7.	A HŰTŐRENDSZEREK BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGEINEK ELLENŐRZÉSE.....	53
7.1	Bevezetés.....	53
7.2	Az MIT kutatások hasznosítása az FVR és THNH változatok összehasonlítására: első lépés.....	53
7.3	A tornyos hűtés költségei az EPA ajánlása szerint: második lépés.....	55
7.4	Az elmúlt évtized néhány hűtőtornyának építési költsége: harmadik lépés.....	55
7.5	Részletes költségszámítások: negyedik lépés .....	56
7.5.1	A vizsgált változatok.....	56
7.5.2	Beruházási költségek.....	56
7.5.3	Összehasonlító értékelés .....	58
8.	ÜZEMELÉSI ÉS ÉLETCIKLUS KÖLTSÉGEK .....	61
8.1	Bevezetés.....	61
8.2	Az életciklus költség .....	61
8.3	A Tanulmány üzemelési- és ÉcK költség-becslése: észrevételek .....	63
8.4	A THNH üzemelési és ÉcK költsége (2 x 1200 MW) .....	63
8.4.1	Az értékelés módszere.....	63
8.4.2	Költség- és veszteségforrások .....	64
8.4.4	A kicső energia és a léghőmérséklet kapcsolata .....	70
8.4.5	Trendvizsgálat .....	71
8.4.6	Összefoglalás: üzemelési és ÉcK költségek (1990–2010) .....	72
8.5	Az FVR rendszer üzemelési költsége.....	73
8.5.1	Az értékelés módszere.....	73
8.5.2	Költség és veszteségforrások .....	73
8.5.3	A költségek becslése üzemszimuláció alapján (jelenlegi környezetszabályozás) ..	74
8.5.4	Az elkeveredés visszahűtésének hatása az üzemköltségre.....	76
8.5.5	A költségek összegzése .....	77
8.6	A klímaváltozás és a medermélyülés hatásai .....	78
8.6.1	A medermélyülés várható alakulása.....	79
8.6.2	A klímaváltozás várható hatása a veszteségekre: THNH.....	81
8.6.3	A klímaváltozás várható hatása a veszteségekre: FVR .....	82
9.	A VÁLTOZATOK TÖBB-SZEMPONTÚ ÉRTÉKELÉSE .....	83
9.1	Bevezetés.....	83
9.2	Költségek.....	85
9.3	Vízdíj és az energia ára .....	86
9.4	Üzemelési előnyök és hátrányok.....	86
9.5	Mederváltozás .....	87
9.6	Visszaduzzasztás .....	87
9.7	Éghajlatváltozás .....	87
	(A) THNH.....	87
	(B) FVR.....	88
9.8	Elkeveredés és határértékek .....	89
9.9	Környezeti hatások.....	91
9.10	Környezeti szabályozás .....	91
9.11	Összefoglaló értékelés.....	91
	(1) Költségek.....	92
	(2) Bizonytalanságok.....	92
	(3) A bizonytalanságok mérséklése: a költségek újra értékelése .....	94
	(4) A környezeti hatások .....	95
9.12	Stratégiai kérdések .....	96

9.13 Javasolt vizsgálatok.....	97
<b>10. KÖVETKEZTETÉSEK .....</b>	<b>99</b>
Az éghajlatváltozás hatásai .....	100
Környezeti hatások .....	100
Környezeti szabályozók .....	101
Elkeveredés és bevezetési változatok.....	101
Beruházási költségek.....	101
Üzemelési és életciklus költségek.....	102
Több-szemponitú elemzés.....	103
Javasolt vizsgálatok.....	104
<b>RÖVIDÍTÉSEK .....</b>	<b>105</b>
<b>IRODALOM .....</b>	<b>107</b>
<b>7.1 MELLÉKLET: 2 X 1200 MW TORONY BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGEI (PAE ADATSZOLGÁLTATÁS) .....</b>	<b>109</b>
<b>7.2 MELLÉKLET: FRISSVÍZHÜTÉS ÉS MELEGVÍZ-VISSZAVEZETÉS BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGEINEK BECSLÉSE .....</b>	<b>111</b>
1. Frissvízhűtés.....	111
1.1 Építési költségek .....	111
1.2 Gépészeti költségek.....	112
2. VITUKI vízvisszavezetés.....	113
2.1 Árreferenciák (2005–2006; 1 € = 250 Ft) .....	113
2.2 A VITUKI bevezetés költségeinek becslése .....	114
3. VKKT vízbevezetések.....	115
3.1 Egy darab bevezetés .....	115
3.2 Kettő darab bevezetés.....	115
3.3 Három darab bevezetés .....	115
<b>8.1 MELLÉKLET: A THNH ÜZEMELÉSI KÖLTSÉGE (2 X 1200 MW) .....</b>	<b>117</b>
1. Az értékelés módszere.....	117
2. Költség- és veszteségforrások .....	117
2.1 A főhűtőkör és a pótvízellátás szivattyúinak önfogyasztása .....	117
2.2 Vízhatszárítás .....	121
2.3 A vízkezelésből származó iszap.....	122
2.4 Termelési kiesés .....	122
3. Trendvizsgálat .....	127
4. Érzékenységvizsgálat: kieső energia és léghőmérséklet .....	128
5. Összefoglalás: üzemelési költségek az elmúlt évtizedek környezeti és szabályozási feltételei között .....	129
<b>8.2 MELLÉKLET: AZ FVR ÜZEMELÉSI KÖLTSÉGE .....</b>	<b>129</b>
1. Az értékelés módszere.....	131
2. Költség- és veszteségforrások .....	131
3. A költségek becslése üzemszimuláció alapján (jelenlegi környezetszabályozás) .....	132
3.1 Adatok és jellemzők .....	132
3.2 A hűtőrendszer üzemelésének szimulációs modellje, a veszteségek meghatározásának módszere (1990–2010): 2 x 1200 MW.....	133
3.3 A turbina megválasztásának jelentősége.....	135
3.4 A dunai szivattyúzás megválasztásának jelentősége.....	138
3.5 Eredmények: a költségek alakulása.....	143
3.6 Az elkeveredés visszahűtésének hatása az üzemköltségre.....	143
3.7 A költségek összegzése .....	145

8.3 MELLÉKLET: KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS MEDERMÉLYÜLÉS: AZ ÜZEMELTETÉS VÁRHATÓ JÖVŐBENI FELTÉTELEI.....	147
1. Bevezetés.....	147
2. A medermélyülés várható alakulása.....	147
3. A klímaváltozás várható hatása a veszteségekre: THNH.....	152
3.1 A klíma- és mederváltozás várható hatása a veszteségekre: FVR .....	153

## 1. BEVEZETÉS

A Paksi Atomerőmű Zrt. 2010-ben fővállalkozóként döntés-előkészítő tanulmány (továbbiakban Tanulmány) készítésével bízta meg a GEA EGI Zrt.-t (alvállalkozók: Mélyépterv Komplex Zrt., VITUKI Kft.<sup>7</sup>, ETV Erőterv Zrt. és Paksi Mérnöki Kft.), azzal a céllal, hogy tegyen javaslatot a létesítendő új erőmű blokkok (2 x 1200 vagy 2 x 1600 MW) hűtési megoldására. A Tanulmány célja, hogy feltárja a tervezett bővítés hűtési lehetőségeit és ezek közül a legkedvezőbb műszaki megoldást válassza ki, figyelembe véve az energetikai, a gazdaságossági, az üzemeltetési, a környezeti, vízhasználati, biztonsági és egyéb szempontokat, továbbá a törvényi/hatósági előírásokat.

A Tanulmány – a kiírás szerint – 4-4 frissvízhűtéses illetve hűtőtornyos megoldást javasol. A (i) frissvízhűtéses és a (ii) hűtőtornyos változatokat az *első fázisban* – a megadott szempontok alapján – saját csoportjukban rangsorolja. Az elvárt eredmény egy-egy legkedvezőbbnek ítélt változat kiválasztása. A *második fázis* ezek beható értékelése és összehasonlítása alapján javaslatot tesz a végleges megoldásra. A kérdés: frissvízhűtéses vagy hűtőtornyos változat?

Az MVM Zrt. (Megbízó) és a Paksi Atomerőmű Zrt. 2011-ben szükségét látta a rendkívül szerteágazó munka független felülvizsgálatának, tekintettel a meghozandó döntés nagy horderejére és hosszú távú hatására. Ennek elvégzésére a BME VKKT-t kérték fel. Az ajánlatkérésben átadott „Műszaki specifikáció” alapján az elvégzendő munka célja a megoldások műszaki, gazdasági és környezeti szempontú felülvizsgálata. A felülvizsgálat értékeli mindkét fázist, és javaslatot ad az esetleges módosításokra, pótlásokra, vagy kiegészítésekre. Ezen belül mérlegeli

- (a) a gazdasági (beruházási és üzemelési költségeinek) alapadatainak;
- (b) a gazdasági jellemzők alkalmazott összehasonlító módszerének;
- (c) az energiatermelésre, vízfogyasztásra, a környezetre és biztonságra gyakorolt hatások kimutatásának és az ezekből levont következtetéseknek;
- (d) az esetleges további vizsgálatokra, továbbá
- (e) a mindezek ezek alapján kialakított rangsorolásának

a megfelelőségét, figyelembe véve a tervezett hatvan éves élettartamot (a tervek szerint 2025-től kezdődően).

A felülvizsgálat egyedi, rövid határidejű megbízást jelent, ami alapos ismereteket igényel a hőtechnikai, az energetikai, a gazdasági, a hidrodinamikai és elkeveredési, környezeti, továbbá több-szempontú elemzések területén.

A részfeladatok az alábbiak szerint jelölhetők ki:

- Az elkészített tanulmányok kritikai értékelése.
- A nemzetközi irodalom áttekintése az érintett (energetikai, környezeti, elkeveredési, költség, éghajlati stb.) területeken. Jövőkép és az értékelés főbb szempontjainak kiválasztása.
- Módszertan kidolgozása a felülvizsgálat elvégzésére, figyelembe véve a vizsgált hűtési változatokat és az értékelés szempontjait.
- Termodinamikai, hidraulikai és gazdasági számítások a megtermelt energia változására, a környezeti tényezők függvényében (lég- és vízhőmérséklet, vízhozam,

---

<sup>7</sup> A MÉLYÉPTERV Komplex Zrt. alvállalkozója

relatív páratartalom), nedves hűtőtornyos és frissvízhűtésű változatokra. Hidrodinamikai és hő-transzport számítások az 500 m-es szelvényben kialakuló maximális hőmérséklet becslésére a vízhozam, a hő-lépeső és a kivett víz hozama függvényében. Felmelegedett hűtővíz visszavezetés diffúzorok segítségével.

- Az éghajlati hatások statisztikai becslése, különös tekintettel a vízhozam, és a vízhőmérséklet, valamint a léghőmérséklet lehetséges változásaira.
- A jelenlegi és lehetséges jövőbeni vízi környezeti előírások és azok figyelembe vétele az értékelések során.
- A beruházási és üzemelési költségek ellenőrzése (figyelembe véve a változatoktól függő kieső, illetve korlátozott energiatermelésű időszakokat), irodalmi adatok, mérnöki becslések, modellszámítások és más területről átvett tapasztalatok alapján.
- A változatok átfogó értékelése. Bizonytalanságok és rangsorolások.
- Javasolt további elemzések.

A felvázolt döntés-előkészítő tanulmány elkészítését a legkedvezőbb hűtési változat kiválasztására – a helyi sajátosságokon túl – indokolja, hogy a nemzetközi irodalom roppant kevés, hasznosítható összehasonlító elemzést tartalmaz. Igazából az MIT tanulmány sorozata emelendő ki: Najjar és munkatársai különböző hűtési módokat (frissvízhűtés, hűtőtó, nedves és száraz hűtőtornyok) optimalizáltak és hasonlítottak össze energetikai, gazdasági és környezeti szempontból (Najjar et al, 1979). A nukleáris változat 1200 MW névleges kapacitású GE turbinával rendelkezett, azaz a tervezett kisebb paksi blokknak felel meg. Az erőmű hipotetikus középső folyó partjára telepített a Mississippri vízgyűjtőjén, ami a hidrológiai és környezeti feltételeket határozza meg. Az elemzések alapján – a jelen felülvizsgálat szempontjából – az alábbi megállapítások bocsáthatók előre:

- A frissvízhűtésű rendszerek (FVR) rendelkeznek a legalacsonyabb kondenzátor hőmérséklettel és így a legmagasabb Carnot-hatásfokkal.
- A vizsgálatok szerint az FVR-ek biztosítják – az adott hőmérsékleti viszonyok mellett – a legmagasabb éves energiatermelést, ami a viszonylag állandó működés következménye (kivéve a magas T értékeket). A természetes huzatú nedves hűtőtornyokat (TINH) ilyen szempontból a hűtőtavak is megelőzik.
- Tranzien körülmények között (három órás meteorológiai- és napi hidrológiai adatok alapján szimulálva) számottevő szezonális, szinoptikus és napi ingadozások tapasztalhatók. A legkisebb fluktuációk az FVR-eket, majd a hűtőtavakat jellemzik (nagy a víztestek termikus inerciája), amit a nedves-, végül a száraz hűtőtornyok követnek. A nyári három hónapban a nedves tornyos energiatermelés

- A környezeti hatások a költségekkel fordítottan változnak: [REDACTED]

A következtetések helytállóságát a tervezett paksi bővítésre részletesen ellenőrizzük majd.



## 2. EGI/GEA ELŐZETES MEGVALÓSÍTHATÓSÁGI TANULMÁNY: KRITIKAI ÉSZREVÉTELEK

A jelen fejezet célja a főbb kritikai észrevételek összefoglalása. Mint látható lesz, ez a megjegyzések széles körét jelenti. Így említhetők általános és specifikus észrevételek, továbbá olyan felvetések, amelyekre a válasz csak részletes elemzések alapján adható. Ezekkel a további fejezetek foglalkoznak. A megjegyzések alapvetően jobbító szándékúak: céljuk az anyagok színvonalának javítása és teljesebbé tétele, az eredmények továbbfejlesztése, valamint a feltett döntési kérdés megalapozott megválaszolása.

### 2.1 Általános rész

A több cégből álló konzorcium szerteágazó, nagy volumenű, nehéz munkát végzett, amelyet a két említett fázis tanulmánya foglalkoztat össze. Ezek kiterjednek hőtechnikai, energetikai, gazdasági, környezeti, technológiai és egyéb kérdésekre. A színvonal általában jó, de heterogén, a hűtőtornyos megoldás javára. Ugyanakkor hiányosságok is tapasztalhatók. Ezek okai és jelei többértékűek:

- (i) [REDACTED]
- (ii) [REDACTED]
- (iii) [REDACTED]
- (iv) [REDACTED]
- (v) a „jövőkép” nem teljes: például a medermélyülés hatásának elemzése<sup>8</sup> egy mondatra terjed ki, a leendő környezeti szabályozás tárgyalása nem következetes vagy a VGT ajánlást bizonyosságnak tekintik stb., ugyanakkor a felvázolt érzékenysgvizsgálat jó gondolat, az éghajlatváltozás szerepét több helyen és egymástól eltérően értékelik (az éghajlat - víz hőmérséklet tartósság kapcsolata megfelelően tárgyalt a II. Kötetben), [REDACTED]
- (vi) az eredmények jelentős része nem reprodukálható (például az életciklus költséget alapvetően befolyásoló üzemelési költségek becslése vagy a frissvízhűtésű turbina tartamgörbéje a kieső energia számításához);
- (vii) hiányzik azoknak a fontos kérdéseknek a kijelölése (például: véleményünk szerint az optimistán kezelt, leiszapolásból származó víz kezelése és elhelyezése, a vízkezelésből származó iszap sorsa, a diffúzoros bevezetés hidraulikai kialakítása stb.), amelyek a költségeket nem elhanyagolható módon befolyásolhatják;

A főbb kritikai észrevételeket az alábbiakban foglaljuk össze.

<sup>8</sup> II. kötet 12. oldal: „Jelentős problémát okoz a Duna 1 m közeli medermélyülése” (máshol 1.5m-t ír).

## 2.2 Specifikus megállapítások és kérdések

- (a) A hőmérsékleti korlátok és a tartósság területén a II. kötet több ellentmondást tartalmaz. Az érvényben lévő jogszabály  $\Delta T$ -t és  $T_{max}$ -ot ír elő, utóbbit a bevezetés alatt 500 m-rel. Ezzel szemben a jelentés és az életciklus-elemzés a kieső energia becslésénél – a variánsok többségénél –  $T_{max}$ -ot a kilépő szelvényben értelmezi (nem követve következetesen a három megkülönböztetett esetet: alap-, jelen- és távlati eset). Így a természetes lehűlés kompenzáló hatását ( $\Delta T_{elk}$ ) gyakran elhanyagolják.  $\Delta T_{elk} = f(Q, q, D_y, \text{bevezetési helyek száma stb.})$  értéke a mai körülmények között 2 - 4 °C, ezt számolják is (II. kötet és melléklete). A korlát:

$$30 \text{ °C} \geq T_h + \Delta T - \Delta T_{elk}, \text{ azaz}$$

$$30 \text{ °C} + \Delta T_{elk} \geq T_h + \Delta T.$$

Mindez azt jelenti, hogy a jelenlegi állapotra, a visszavezetés szelvényében nem 30 °C-os, hanem annál  $\Delta T_{elk}$ -vel magasabb korlát létezik, amit azonban nem ritkán figyelmen kívül hagynak. Így nem világos és zavaró a végkövetkeztetés, évente mennyi időre szükséges az utóhűtés (II. kötet, 2.1 fejezet), ha egyáltalán szükséges.

- (b) Az elmondottak miatt, a  $T$  tartamgörbéből adódóan a visszaterhelés miatt kieső energia  $\Delta T_{elk}$  figyelembe vételével valójában csak hányada a számoltnak (lásd a következő pontot).

- (c) [Redacted]

- (d) Az eddigiekből már most érzékelhető, hogy OMRK és ÉcK roppant érzékeny a környezeti korlát előírására: milyen alapra támaszkodva hol, milyen víz hőmérsékleti érték betartását határozzák meg. [Redacted]

- (e) Nem világos a helyzet a „kritikus állapot” definiálásával kapcsolatban sem (háttér hőmérséklet és vízhozam): a legkedvezőtlenebb múltbeli értékek, statisztikai megfontolások, klímaváltozás és egyébek keverednek, több jelentésben és egy-egy jelentésben belül is ellentmondásosan [Redacted]

- (f) [Redacted]
- [Redacted] A Tanulmány I. Kötete (176. oldal) helytelenül tényként kezeli.

<sup>o</sup> A május végi 4.4.3-1. melléklet is ezt a számot tartalmazza a „korlátos” esetre.

hogy 19 illetve 22 °C felett hűtőtornyos utóhűtés szükséges. Ráadásul az utóhűtés megoldás (ugyanott 173. oldal) csak 27 °C háttérhőmérsékletig működik biztonságosan, a méretezés pedig nem ismert. Nincsen olcsóbb variáns?

- (g) Nem világos, mi a sorsa a régi blokkok hűtőrendszerének. 2030 után elbontásra kerülnek?
- (h) Az üzemelési költséggel kapcsolatos, további észrevételeket [redacted] tartalmaz.

### 2.3 Elemzéseket igénylő kérdések

- (a) Bemutatjuk, hogy a diffúzoros hevezetés – a Duna nagy hígító hatása mellett – számottevő elkeveredést és lehűlést képes biztosítani, környezeti szabályozástól függően (lásd a 6. fejezetet és a Tanulmány II. kötetét is).
- (b) „Tabu kérdés”, de fel kell tenni: egy esetleges duzzasztás hogyan befolyásolja az elkeveredési viszonyokat és a hűtési rendszer kiválasztását?
- (c) A bemutatott elkeveredési számítások megfelelő 2D hidrodinamikai és hőtranszport alapokkal rendelkeznek (ugyan a 2D írásmód sok finom hatást figyelmen kívül hagy). Az analitikus elkeveredési számítások gyakorlatias és elfogadható közelítést jelentenek. Ugyanakkor kérdéseket is vetnek fel: a  $T_{max}$  értékek és hőmérséklet-eloszlások több esetre, szemre megegyeznek [redacted]

[redacted] Két változatra ugyanis

$$T_{max} = T_h + q\Delta T / h(\pi D_{yvx,x})^{1/2}$$

csak úgy lehet azonos (következésképpen 30 °C), ha  $q_1\Delta T_1 = q_2\Delta T_2$ . Teljesül ez a feltétel? És mekkora a 2D közelítés hibája?

- (d) A költségek (beruházási-, üzemelési és életciklus-) reprodukálhatósága nem biztosított (lásd korábban). Emellett a bemutatott eredmények az egyes jelentésekben eltérő értékekkel jelennek meg.
- (e) Az életciklus-elemzés a felvett paraméterek mellett igen érzékeny az OMR költségekre. Mekkora utóbbi hibája és szignifikáns-e a különbség a két végső változat között?
- (f) Miért [redacted] a számítás alapja, [redacted] a tervezett élettartam? A gépészetre mennyi? Miért [redacted] diszkontálási tényező? Érzékenység? A két változatra azonos az élettartam? Hogyan vesszük figyelembe, ha az egyik változat a leírás után még üzemelhet, a másik pedig nem?

- (g) [redacted]

- (h) A variánsok összehasonlításánál szerepet játszik a magas környezeti hőfokoknál fellépő turbinateljesítmény-esökkenés. Ezt a Tanulmány kalkulálja, viszont pontosabb elemzés csak a gyártók garantált adataiból számítható. Szerepet játszik ebben a kondenzátor hőcserélő felülete is, ami szintén csak a gyártó garanciái alapján vehető komolyan számításba. A szállítók adatai hiányában a termelés-kiesési értékek (kWh) bizonytalanok. Figyelmet érdemelhet a turbinák optimalizálása a két esetre, külön-külön, a teljesítménycsökkenés minimalizálása céljából (8. fejezet).

- (i) Az, hogy a tornyok közül a nedves, természetes huzatú bizonyult a legjobbnak várható volt. A hűtőtorny kapacitása nem igényel további vizsgálatot?
- (j) A hűtőtornyos változatnál a leiszapolásból származó víz kezelése és a vízkezelésből származó iszap sorsa elnagyolt, a vonatkozó adatok ellentmondásosak (lásd korábban). A két kérdés alaposabb vizsgálatot igényel. Itt elsősorban a figyelem felkeltése a cél (43. oldal). Kérdés: a frissvízhűtésű rendszer kiegészítéseként alkalmazott mesterséges huzatú nedves hűtőtornyos cellák esetében van-e szükség vízkezelésre (erről nincs szó, lásd a Tanulmány III. kötetét, 43. és 47. oldalak)?

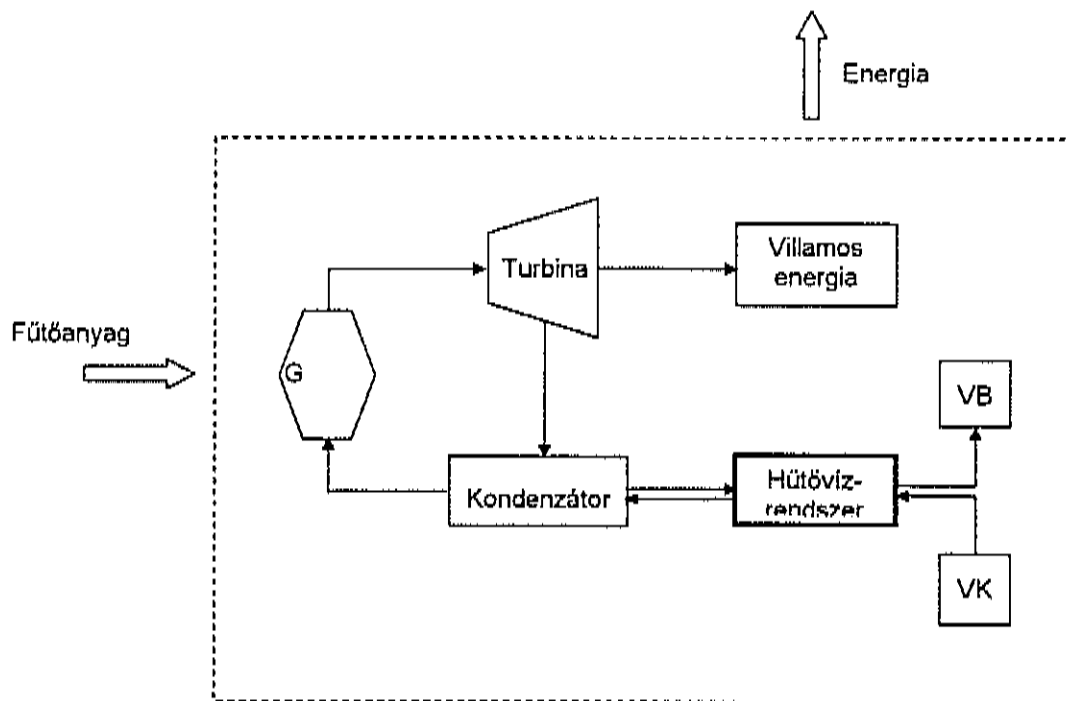
Összefoglalóan, a GEA/EGI Tanulmány egy nagy horderejű projekt hosszabb tervezési és megvalósítási folyamatának fontos kezdeti lépését tette meg. A kritikai észrevételek ellenére, sok hasznos eredményt és a jelen felülvizsgálat által is igazolt következtetést szolgáltatott.

### 3. MÓDSZERTAN

A villamos erőmű jól ismert elrendezését a 3.1 ábra szemlélteti. Célunk ennek vizsgálata és a legkedvezőbb hűtési variáns kiválasztása, figyelembe véve a főbb befolyást gyakorló tényezők potenciális jövőbeni változásait, azaz jövőképünket. Ezt a következőkkel jellemezhetjük:

- Érvényesül az éghajlatváltozás hatása;
- Erősödik a Duna (régió) európai szerepe;
- Számos bizonytalansággal és kockázati tényezővel kell számolni;
- Több területen érvényesülnek politikai döntések (díjak megállapítása, folyószabályozás stb.);
- A nukleáris energia ellentmondásos megítélése nem változik;
- Folytatódik az ökológia felértékelődése (lásd az EU VKI szemléletét és célkitűzését);
- Az elővigyázatosság és rugalmas tervezés fokozódó figyelmet nyer;
- Előrelépés figyelhető meg a nyílt tervezés megvalósításában.

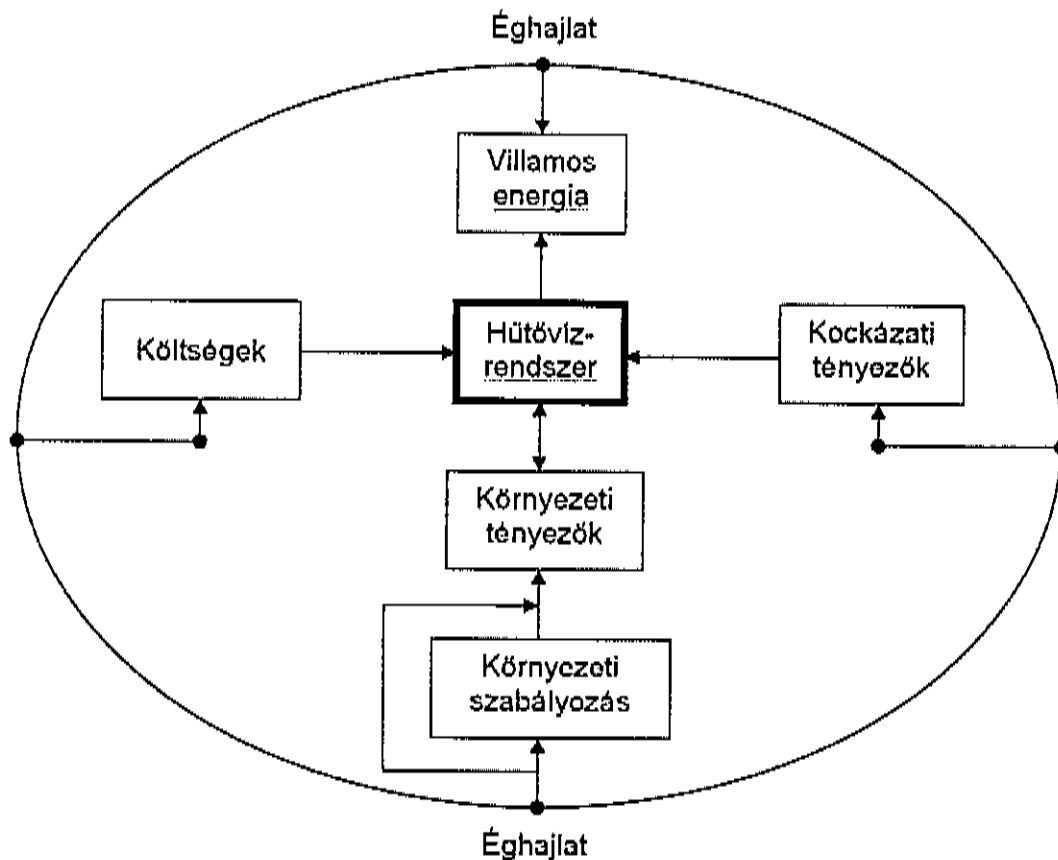
Érzékelhető, hogy a rendszer igen összetett és ilyenkor ésszerű a problémát részekre bontani. Itt a dekompozíció és az aggregáció módszerét alkalmazzuk (Somlyódy and van Straten, 1986).



3.1 ábra: Villamos erőmű elrendezése  
VK – vízkivétel, VB – víz bevezetés, G – gőztermelés

Az eljárás lényege, hogy első lépésben a feladatot olyan részekre bontjuk (dekomponáljuk), amelyek a saját léptékükön, részletes elemzésekkel és gyakran dinamikus modellekkel jól kezelhetők (például a villamos energiatermelés számítása tranziens modellel vagy az elkeveredés tanulmányozása 3D modellel, 2. lépés). A vizsgálatok rész-eredményeit a harmadik lépésben, a probléma egészének kivánalmait szem előtt tartva aggregáljuk (például hosszabb távú évi átlagokat képezzük az energiatermelésre és az üzemelési költségekre,

analitikus modellt illesztünk a 3D változatra), majd ezeket összekapcsolva, több-szempontú elemzés révén jutunk el a megoldáshoz (ha van ilyen).



3.2 ábra: A felülvizsgálat és az elvégzett elemzés módszertana

A módszer részleteit a 3.2 ábrára alapozva mutatjuk be. A rendszer központi elemét a kiválasztandó hűtővízrendszer képezi. Ez függvénye a villamos energiatermelésnek, a költségeknek (azaz a bevételeknek és a kiadásoknak), a környezeti tényezőknek és az ezekre vonatkozó szabályozásnak, valamint a kockázati tényezőknek. Figyelembe véve a tervezett projekt 60 éves élettartamát, ilyenből sok van: a már ma is megfigyelt medermélyülés, az esetleges duzzasztás, a villamos energia árának és a vízhasználati díjnak a változása, az ökológia felértékelődése és mások. Ezek a tényezők meghatározzák a jövőképünket és a 3.2 ábrán látható módon mintegy körülbástyázzák a hűtővízrendszert és annak kiválasztását. Végezetül az egész problémakört körülveszi az éghajlatváltozás, amely ugyan eltérő módon, de szinte az összes felsorolt tényezőt befolyásolja.

Az éghajlatváltozás jövőbeni potenciális hatásait globális és regionális modellekkel vesszük figyelembe. Ezekhez illetve hasznosítunk múltbeli észleléseket a vízhőmérsékletre és -hozamra, továbbá a léghőmérsékletre és a nedvességtartalomra (az elmúlt 15–37 évre rendelkezünk adatokkal). Ezekkel, az analógia módszer keretei között végzünk statisztikai elemzéseket és vonunk le következtetéseket a jövőre (például a Duna háttér-hőmérsékletére, a magas hőmérsékletű időszakok tartósságára). Az eljárás lényege, hogy a regionális modell által (például 2030-ra) prognosztizált évi vagy nyári átlagos hőmérsékletnövekedésnek megfelelő éveket válogatunk le és ezeket tekintjük a jövőnek. A (tranzien) villamos energiatermelést, FVR esetében a vízjárás-függően kivett hűtővíz mennyiségét és egyéb

jellemzőket megkíséreljük korrelálni az évi/nyári átlag értékekkel és az ily módon származtatott empirikus összefüggéseket használjuk fel a prognózis céljaira.

A villamos energiatermelés számításai, figyelembe véve frissvízhűtésre a környezeti előírásokat, vezetnek az üzemelési költség fontos összetevőire. Ilyen például az energiaeszkökenés, az önfogyasztás és a vízigény. Természetesen a THNH és FVR változatokra eltérő modellek vonatkoznak, eltérő éghajlati hatásokkal.

A beruházási költségek becslése a két változatra némi „detektív munkát” is igényel. Itt nemzetközi irodalmi adatokat és megvalósult projektek jellemzőit hasznosítjuk, és tételes „beköltségesítést” is végzünk a két változatra. Végezetül az életciklus költség is levezethető és a két változat gazdasági szempontból összehasonlítható.

A jövőt nagymértékben befolyásolja a környezeti szabályozás. Erre előrejelzés aligha adható, legfeljebb a nemzetközi (elsősorban az EU és az USA) helyzetkép elemezhető. Alapvető kérdés annak a vizsgálata is, hogy különböző bevezetések (diffúzorral vagy a nélkül) esetében a Dunában az elkeveredés és a lehülés hogyan játszódik le és milyen mértékű lesz. Erre a célra – ahogyan arra már utaltunk – 3D hidrodinamikai és hő-transzport modellt alkalmazunk. A részletes számítások birtokában csupán az 500 m szelvény legnagyobb hőmérsékleti értékeit őrizzük meg, és ezekhez rendeljük a bevezetések beruházási költségeit.

A műszaki és gazdasági elemzések az éghajlati és medermélyülési hatásokkal együtt számszerűen elvégezhetők és az életciklus számítás alapján – azok struktúrájától függően (lásd a 8. fejezetet) – rangsorolhatók. Ezt követően veendők figyelembe a további, jövőben változó kockázati vagy bizonytalansági tényezők. Ezeknek egy része nem számszerűsíthető és csupán minőségi értékelés adható. A végeredmény a változatok valamilyen rangsora, nem kizárva két közel egyenértékű variáns megjelenését sem. Ilyen esetben, minden bizonnyal további vizsgálódások és a döntéshozók preferenciáinak figyelembe vétele szükséges a kiválasztás elvégzéséhez. Erre a célra korszerű döntéstámogató rendszer alkalmazása célszerű.

Az elmondottak ismeretében most már jelentésünk felépítése a következő. A 4. fejezet az éghajlatváltozás hatásaival foglalkozik. Az 5. fejezet a környezeti hatásokat hasonlíttja össze különböző hűtési alternatívákra, majd a környezeti szabályozás nemzetközi tendenciáit vázolja fel. A 6. fejezet az elkeveredési számításokat foglalja össze. A 7. és 8. fejezetek a különböző költségek becsléseit tartalmazzák (beleértve az összevetést az EGI becsléseivel), építve a szintén itt bemutatott, tranzien energiatermelési és hidraulikai modellekre. A 9. fejezet a további bizonytalansági és kockázati tényezők lehetséges szerepét vázolja fel több-szempontrú elemzés keretében, majd összefoglaló értékelést ad. A jelentés következtetésekkel zárul. A főbb eredményeket a Vezetői összefoglaló tömöríti.

Megjegyezzük, hogy a sok változat közül a jelen felülvizsgálatban az 2 x 1200 MW bővítésre koncentrálnak, 11 °C hőlépcső mellett, miután a terveket a Tanulmányban erre az alternatívára dolgozták ki. A szerzett tapasztalatok könnyen kiterjeszthetők a 8 °C hőlépcső, illetve a 2 x 1600 MW esetre is.





## 4. AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS HATÁSA

### 4.1 Bevezetés

A jelen felülvizsgálat célja a két fő hűtési változat, FVR és THNH elemzése és összehasonlítása. Mindkettő rendelkezik környezeti hatásokkal és fordítva, a tervezést befolyásolják a környezeti előírások (5. fejezet). Ez különösen a frissvízhűtésre érvényes, amelyre jelenleg – többek között – az 500 m-es szelvényben előírt hőmérsékleti korlátot kell betartani ( $T_{\max} \leq 30 \text{ °C}$ , lásd korábban is). Ilyen szempontból meghatározó, hogy a Duna háttérhőmérséklete ( $T_h$ ) mekkora és hogyan alakul a jövőben, hiszen az 500 m-es szelvényre  $T = T_h + \Delta T - \Delta T_{\text{elk}}$ . Itt  $\Delta T$  a hőlépcső<sup>10</sup> ( $\Delta T \leq 11 \text{ °C}$ ,  $4 \text{ °C}$  alatt  $14 \text{ °C}$ ),  $\Delta T_{\text{elk}}$  pedig az elkeveredés okozta lehűlés a Duna megadott keresztzelvényéig. Hidrodinamikai- és hőtranszport-számítások szerint (lásd 6. fejezet)  $\Delta T_{\text{elk}}$  értéke sok tényezőtől függően  $2$  és  $8 \text{ °C}$  között változik, tehát leegyszerűsítve – a múltbeli mérések ismeretében (lásd később) – a  $21$ – $27 \text{ °C}$  feletti  $T_h$  tartomány lehet kritikus, ami persze függ a környezeti előírások jövőbeni alakulásától is (lásd 5. fejezet).

Kissé általánosabban, a különböző hűtési módokat szem előtt tartva, alapvetően fontos, hogy a levegő- és a víz hőmérséklet, továbbá a nedvességtartalom és a lefolyás hogyan alakul a következő 50 évre az éghajlatváltozás hatására (az erőmű tervezett élettartama 2025–2085). A jelen fejezet a felülvizsgálat éghajlati háttérét kívánja összefoglalni Paks térségére, elsősorban a hőmérsékletekre összpontosítva, a bizonytalanságok figyelembe vételével, a lehetséges összes információ felhasználásával.

### 4.2 Rendelkezésre álló adatok és módszertan

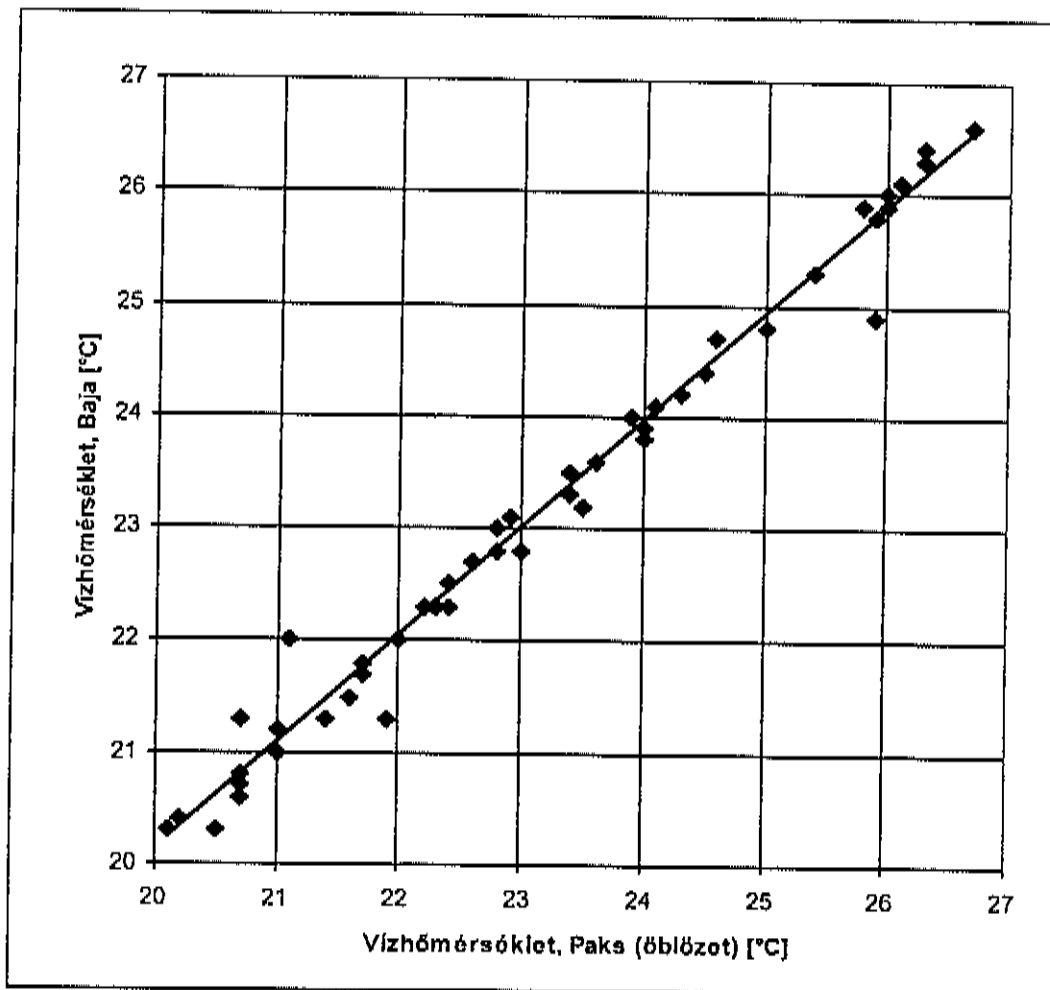
A víz hőmérséklet vizsgálatához rendelkezésre állnak

- a paksi öblözeti víz hőmérsékleti adatok a 1988–2006. évekre (19 év) napi bontásban,
- a bajai víz hőmérsékleti adatok 1974–2010. évekre (37 év) napi bontásban.

A bajai állomási és a paksi öblözeti víz hőmérséklet a 2006. június–augusztusi  $20 \text{ °C}$  feletti értékekre példaképp végzett vizsgálat szerint erősen korrelálnak (4.1 ábra), ami megalapozza feltevésünket, hogy a paksi öblözeti értékek egyenértékűen helyettesíthetők a bajai állomási mérések adataival.

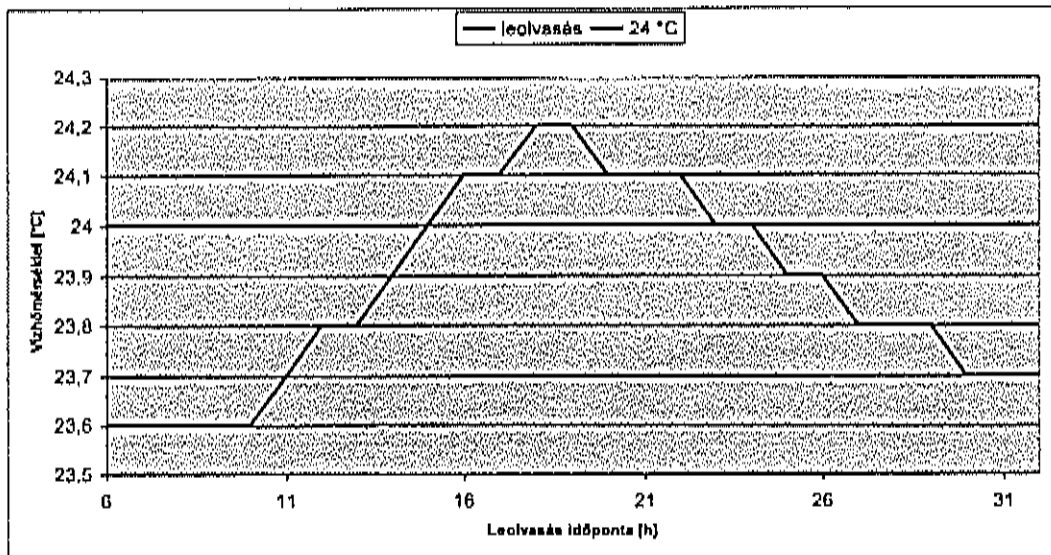
---

<sup>10</sup> Az elemzések  $11$  és  $8 \text{ °C}$  vizsgálnak.



4.1 ábra: A 20 °C feletti bajai és paksi vízhőmérséklet kapcsolata a 2006. június-augusztus hónapok adatai alapján

A bajai állomáson a vízhőmérséklet leolvasása 1989-ig naponta egyszer (nyári hónapokban reggel 7, a téli hónapokban 8 órakor) történt. 2005-től a leolvasás naponta több alkalommal történik, a reggeli órák mellett a napközi és éjszakai órákban is. A nappali órákban mért vízhőmérséklet általában meghaladja a reggeli értékeket, és sokszor átlépheti a valamilyen szempontból kritikus hőmérsékletet. Ilyenre mutat bc példát a 4.2. ábra, amelyen a 2005. augusztus 1. reggel 6 óra és augusztus 2. délelőtt 10 óra közötti időben mért értékek láthatók (kék vonal). Az augusztus 1-jén 7 órakor mért vízhőmérséklet 23.6 °C, másnap augusztus 2-án reggel 7 órakor (az ábrán a 31. óra) mért érték 23.7 °C volt, miközben a két érték közötti idő egy részében, augusztus 1-én 16 és 24 óra között elérte a 24 °C-ot, rövid időre a 24.2 °C-ot. Azaz, a reggeli órákban végzett mérés nem jelzi a nap közbeni melegedést.



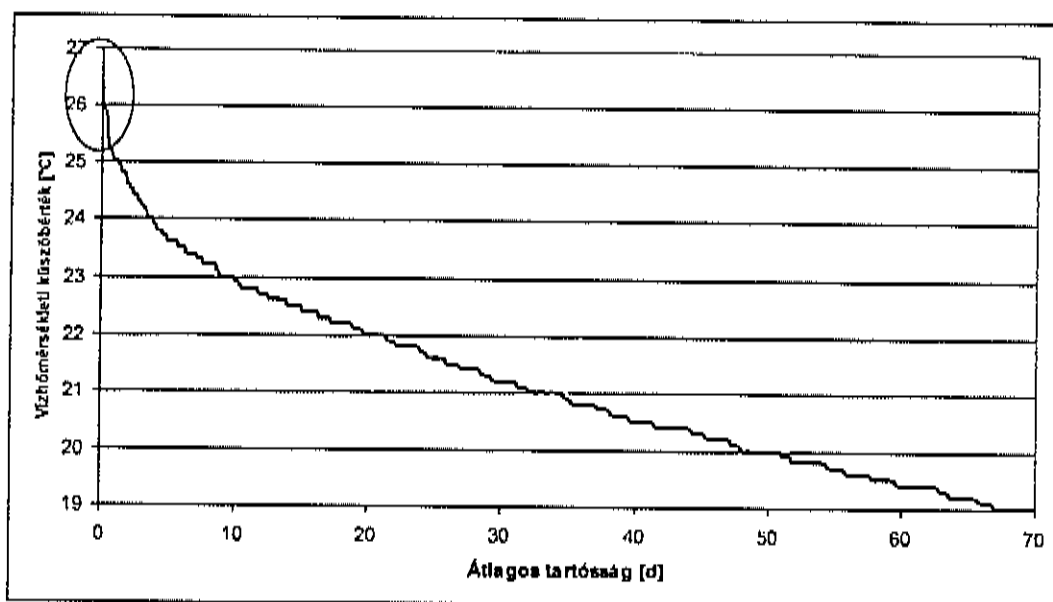
4.2 ábra: A víz hőmérséklet napi alakulása

Mivel 1989. előtt kizárólag a reggeli órában volt mérés, a feldolgozás során csak ezek adatait vehetjük/vehetjük figyelembe, ami miatt vélhetően több, a kritikus hőmérsékletet átlépő nap a tartóssági vizsgálatból kiesik.

A következőkben először a víz hőmérséklet tartósságát és a trendeket vizsgáljuk, különös tekintettel a magas hőmérsékletek jelentette lehetséges kűszöbértékekre. Ezután a jelenlegi éghajlatot jellemezzük, és elemezzük a jövőbeni állapotot, három regionális forgatókönyv alapján, majd áttérünk a Paks térségére és a Dunára vonatkozó, analógián alapuló forgatókönyvek bemutatására.

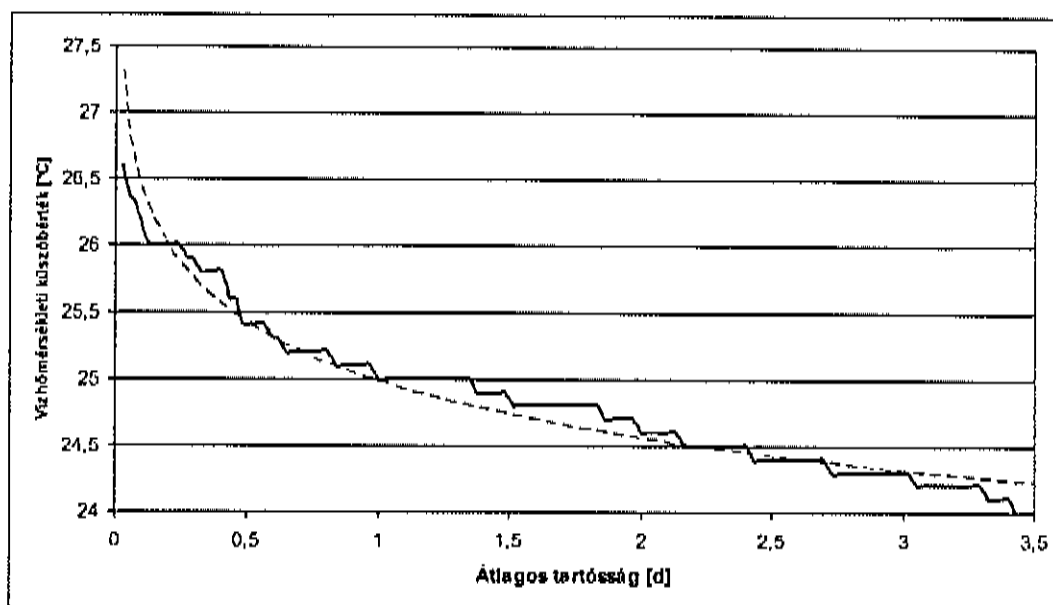
### 4.3 Tartóssági vizsgálat

A különböző (víz)hőmérsékleti kűszöbértékeket meghaladó napok átlagos évi tartósságát az 1974-2010. időszak 37 év adatai alapján vizsgáltuk (4.3 ábra).



4.3 ábra: A 19 °C-ot meghaladó reggeli víz hőmérsékletű napok átlagos tartóssága

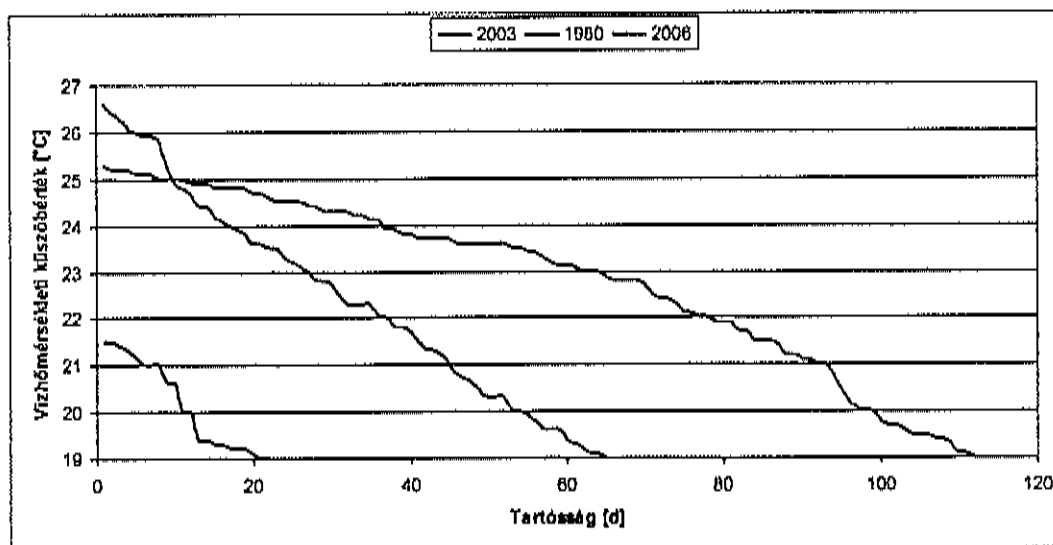
A 4.3 ábra szerint a reggeli órákban a legalább 19 °C víz hőmérsékletű napok száma évi átlagban mintegy 70 nap, azaz tartósságuk közel 2 hónap. A küszöbérték emelkedésével a tartósság előbb lassan (lineárisan) csökken, majd nagyjából 23 °C-ot elérve a csökkenés üteme gyorsul. Az átlagos évi tartóssági görbét a 24 °C feletti tartományra kinagyítva, az empirikus adatokra exponenciális kiegyenlítő görbe illesztésével, is bemutatjuk (4.4 ábra). Észert a 24 °C feletti víz hőmérséklet a jelen éghajlat mellett nagyjából 3–3.5 napon fordul elő, a 25 °C felett 1 napon, 26 °C felett 0.2 – 0.3 napon.



4.4 ábra: A 24 °C-ot meghaladó reggeli víz hőmérsékletű napok átlagos tartóssága (folytonos vonal), és a tartóssági görbe exponenciális görbével (szaggatott vonal) való közelítése

Adott küszöbértékeket meghaladó víz hőmérsékletek tartóssága az egyes években jelentősen különbözhet az átlagostól. Három szélsőséges évet vizsgáltunk: (i) éveket, amikor a 19 °C

feletti vízhőmérsékletű napok száma a legkisebb (1980), (ii) a legnagyobb (2003) és (iii) amikor a mért vízhőmérséklet a legmagasabb, 26,2 °C (2006) volt (4.5 ábra).



4.5 ábra: A 19 °C-ot meghaladó reggeli hőmérsékletű napok tartóssága jellemző években

A „leghidegebb” évben, 1980-ban a mért vízhőfok egyszer sem érte el a 22 °C-ot. A legtartósabban meleg évben (2003) a 19 °C feletti időszak hossza 4 hónap, a 24 °C feletti vízhőmérsékletű napok tartóssága 36 nap, több mint egy hónap. A legnagyobb mért értéket elérő évben (2006) a 19 °C feletti időszak hossza mindössze 2 hónap, de a 24 °C-ot meghaladó napok száma 17 nap, a 25 °C-ot meghaladóé 9 nap, és a 26 °C-ot meghaladóé 5 nap. Adott vízhőmérsékletű küszöbértékeket meghaladó napok átlagos és szélsőséges tartóssági értékeit a 4.1 táblázatban is összefoglaltuk. A tartóssági értékek jelentős szórást mutatnak, az ingadozás tartománya jelentős.

	19 °C	20 °C	21 °C	22 °C	23 °C	24 °C	25 °C	26 °C
<b>Átlagos</b>	70.6	50.8	34.6	21.3	10.0	3.9	1.4	0.24
<b>Minimum</b>	22	12	8	0	0	0	0	0
<b>Maximum</b>	112	99	93	78	64	37	11	5

4.1 táblázat: Adott hőmérsékleti küszöbértékeket meghaladó napok átlagos és szélsőséges tartóssága

#### 4.4 Az évi tartósság időbeli alakulása

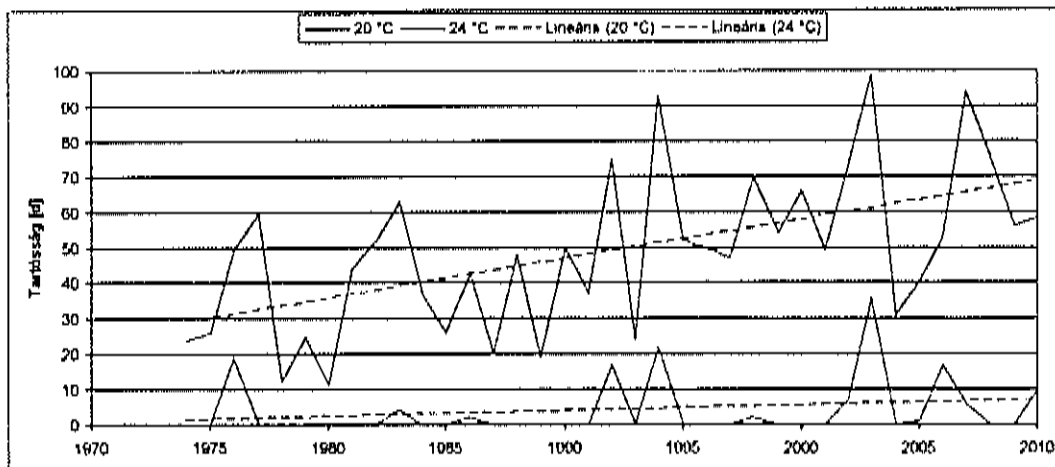
Adott küszöbértékeket meghaladó vízhőmérsékletű napok tartósságát az egyes évekre a 4.2 táblázat foglalja össze.

	19	20	21	22	23	24	25	26
<b>1974</b>	41	24	21	9	0	0	0	0
<b>1975</b>	62	30	11	1	0	0	0	0
<b>1976</b>	75	49	40	35	29	19	9	0

	19	20	21	22	23	24	25	26
1977	77	59	46	15	0	0	0	0
1978	29	13	8	1	0	0	0	0
1979	56	25	14	1	0	0	0	0
1980	22	12	8	0	0	0	0	0
1981	67	45	22	12	0	0	0	0
1982	86	49	21	12	6	0	0	0
1983	87	63	46	31	10	4	0	0
1984	65	37	13	0	0	0	0	0
1985	41	26	19	9	2	0	0	0
1986	73	54	30	23	13	2	0	0
1987	36	20	8	4	0	0	0	0
1988	56	48	35	19	3	0	0	0
1989	44	33	19	6	0	0	0	0
1990	70	50	36	16	3	0	0	0
1991	59	37	15	7	3	0	0	0
1992	80	75	62	46	36	17	4	0
1993	80	45	25	5	0	0	0	0
1994	97	83	63	50	38	22	14	4
1995	55	52	48	36	8	0	0	0
1996	71	50	21	6	0	0	0	0
1997	63	47	18	3	0	0	0	0
1998	77	60	50	39	27	2	0	0
1999	95	54	34	15	7	0	0	0
2000	89	66	37	17	4	0	0	0
2001	70	50	44	29	7	0	0	0
2002	88	73	55	45	22	7	0	0
2003	112	99	93	78	64	36	11	0
2004	82	49	31	22	4	0	0	0
2005	77	41	23	14	6	1	0	0
2006	65	54	45	37	27	17	9	5
2007	106	97	79	67	28	6	0	0
2008	104	77	50	34	8	0	0	0
2009	75	56	42	16	2	0	0	0
2010	70	58	28	17	12	10	3	0

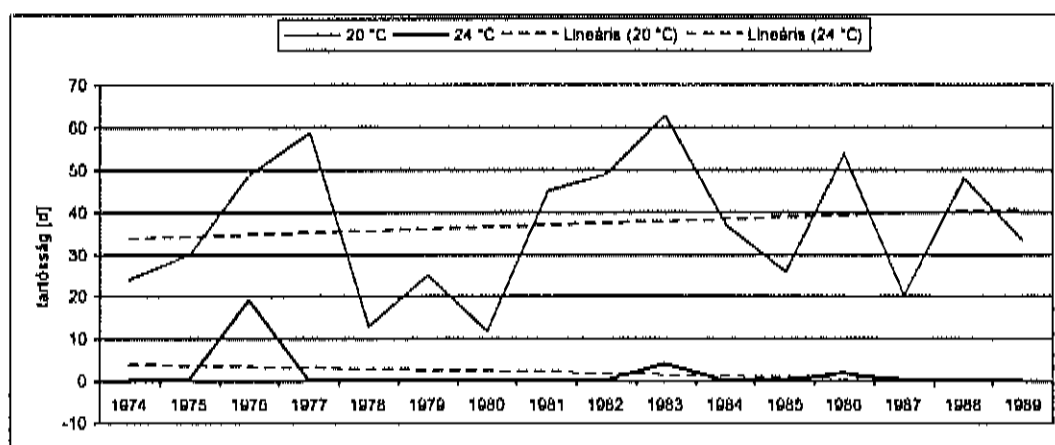
4.2 táblázat: Adott küszöbértékekhez tartozó vízhőmérsékletű napok tartóssága

A tartóssági értékek a teljes időszak alatt, 1974–2010 között, emelkedő tendenciát mutatnak. A részletesebb tendenciavizsgálat eredményét a 20 és 24 °C küszöbértékre számított idősorokra a 4.6 ábra mutatja be. A tartósság növekedésének üteme a 20 °C küszöbérték esetén 10 nap/évtized, 24 °C küszöbérték esetén mintegy 1.5 nap/évtized értékekre becsülhető.



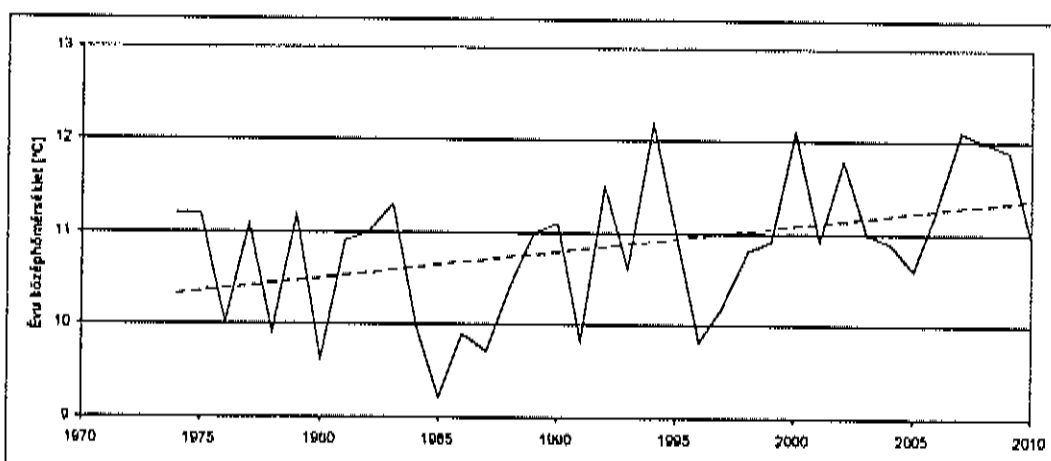
4.6 ábra: A 20 és 24 °C-ot meghaladó vízhőmérsékletű napok tartósságának alakulása

Jóllehet a tendencia jellegű emelkedésben Bajánál nem zárható teljesen ki a paksi atomerőmű által a Dunába visszabocsátott hűtővíz melegítő hatása, a növekedés okát elsősorban az éghajlatunk általános melegedésében véljük. Ezt támasztja alá, hogy az időszak első része, 1989-ig nem mutat lényeges emelkedő tendenciát (4.7 ábra), abban az időszakban, amikor az erőmű már üzemelt, de a csak az utóbbi évtizedekben gyorsuló éghajlati melegedés még kevésbé éreztette a hatását.



4.7 ábra: A 20 és 24 °C-ot meghaladó hőmérsékletű napok tartósságának alakulása a melegedés gyorsulása előtti években

Az évi középhőmérséklet emelkedése – a bajai meteorológiai állomás adatai alapján – nyilvánvaló; az emelkedés üteme  $0.32\text{ °C/évtized}$  (4.8 ábra).



4.8 ábra: Az évi közepes léghőmérséklet alakulása a bajai meteorológiai állomás alapján

További igazolásnak tekintjük, hogy a különböző háttér küszöbértékekhez tartozó tartóssági értékek növekedése jó korrelációs kapcsolatban van a nyári hónapok, június–augusztus (19–21 °C esetén), illetve a júliusi–augusztusi hónapok (22–25 °C esetén) léghőmérsékletének emelkedésével (4.3. táblázat). A kapcsolat különösen szoros a küszöbérték 20–22 °C tartományában, felette – részben a kevésszámú adat miatt is – kevéssé mutatkozik erősnek.

Küszöb, °C	19	20	21	22	23	24	25
Év	0.567	0.636	0.609	0.532	0.337	0.237	0.179
Nyár (VI–VIII)	0.670	0.800	0.779	0.757	0.604	0.484	0.366
Június–július	0.620	0.740	0.709	0.723	0.634	0.540	0.370
Július–augusztus	0.515	0.718	0.763	0.765	0.637	0.540	0.416

4.3 táblázat: A nyári időszak és az év levegő középhőmérsékletének összefüggése adott küszöbértéket meghaladó vízhőmérsékletű napok tartósságával.  
A táblázat mezőiben a korrelációs tényezők szerepelnek.

A nyári évszak illetve nyári hónapok és a különböző küszöbértéket meghaladó vízhőmérséklet-tartósság közötti szoros kapcsolat azt a következtetést is engedi levonnunk, hogy az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatában alapvetően és szinte kizárólagosan fontos, miként változik ezen időszakok hőmérséklete. Éghajlati hatásvizsgálatainkat ezért erre az időszakra alapozva végezzük.

#### 4.5 Hazai éghajlati forgatókönyvek

A Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (2008) előrejelzése szerint a XXI. században hazánk éghajlata melegebbé és szárazabbá válik, mediterrán jellege erősödik. A hőmérséklet az évben és minden évszakban emelkedik, az évi csapadék kismértékben csökken, miközben nagyobb átrendeződése lehetséges az évszakok között: növekszik a téli-tavaszi és csökken a nyári-őszi félévben. Gyakoribbá válnak az időjárási szélsőségek (hőhullámok, nagycsapadékok), növekszik a tartósságuk és intenzitásuk.



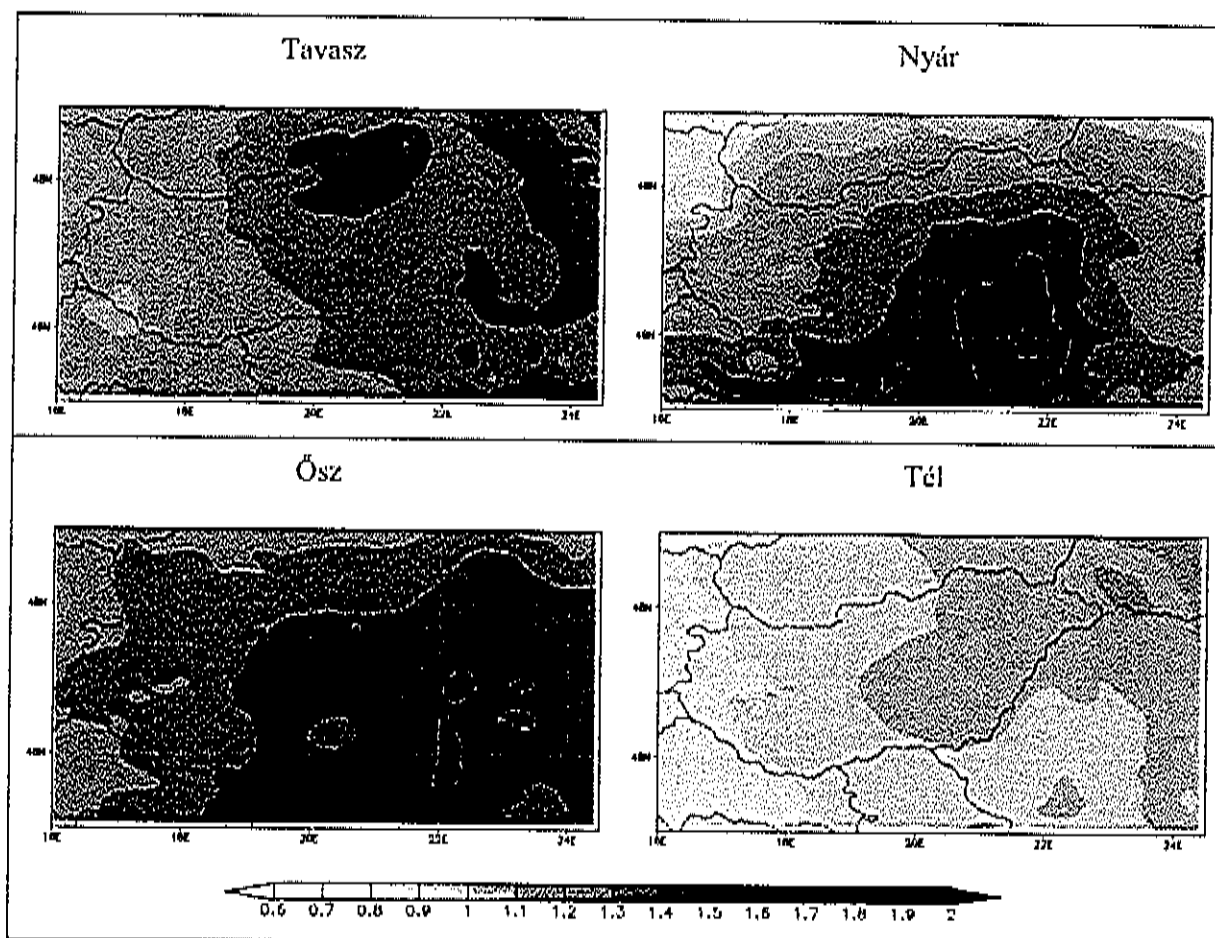
A melegedés hazánkban (és a Kárpát-medencében) a globális átlagnál gyorsabb üteműnek várható: 1 °C globális melegedést itt 1,4 ±0,4 °C hőmérsékletnövekedés követheti. Az 1961–1990 harminceves bázis időszakhoz képest a hőmérséklet 2071–2100 idősakra 4 °C-kal nőhet, a növekedés üteme 0,35 °C/évtized körüli.

A „Környezeti jövőkép – környezet- és klímabiztonság stratégiai program” (Bozó, 2010) keretében 2020–2040 idősakra készült regionális éghajlati forgatókönyvek az üvegházgázok közepes ütemű kibocsátási forgatókönyvéből (A1B), három különböző globális klímamodellből (ECHAM, NCAR, ARPEGE) indultak ki, és globális klímamodellenként eltérő regionális klímamodellt (REMO, RegCM, ALADIN) használtak (Bartholy et al., 2009). A három regionális éghajlati forgatókönyv szerint hazánkban a hőmérséklet várhatóan az évben és minden évszakban emelkedik, a legnagyobb mértékben az Alföldön és legkevésbé a Dunántúlon. A csapadék különböző regionális klímamodellek alapján kapott előrejelzések nem csupán a változás mértékében, de előjelében is eltérnek, az évi csapadék inkább csökken, az évszakai csapadék, forgatókönyvtől függően, növekedhet, vagy csökkenhet (4.4 táblázat).

	Éves	Tavaszi	Nyári	Ősz	Téli
<b>Hőmérséklet, °C</b>	0.8 – 1.8	1.0 – 1.6	0.5 – 2.4	0.8 – 1.9	0.8 – 1.2
<b>Csapadék, mm</b>	(-40.8; +2.4)	(-15.9; +6.0)	(-15.0; +3.0)	(-4.8; +5.1)	(-22.8; +10.8)

4.4 táblázat: Az éves és évszakai hőmérséklet- és csapadékváltozás 2021–2040 évek átlagában Magyarországon várható mértéke a három regionális modell alapján az 1961–1990 időszakhoz viszonyítva

A várható hőmérsékletnövekedést regionális bontásban az 4.9 ábra mutatja be évszakonként. Az ábra alapján Paks – Baja térségére nyáron nagyjából 1,5 °C hőmérsékletemelkedés várható a 2020–2040. időszakig, a növekedés üteme 0,27±0,09 °C per évtized. Ezzel kapcsolatban ismételtül utalunk arra, hogy a mérések szerint 1961-től 2010-ig az évi középhőmérséklet 0,32 °C/évtized ütemmel, a nyári (VI-VIII.) hónapok középhőmérséklete 0,22 °C/évtized ütemmel emelkedett. Gyanítható, hogy a hőmérséklet emelkedése elkezdődött.



4.9 ábra: A 2021–2040-re várható évszakos hőmérsékletváltozás mértéke (°C-ban) a Kárpát-medence térségére: a három regionális klímamodell szimulációi alapján képzett átlagtérképek. Referencia vagy bázis időszak; 1961–1990.

#### 4.6 Jelenlegi éghajlat (bázis időszak)

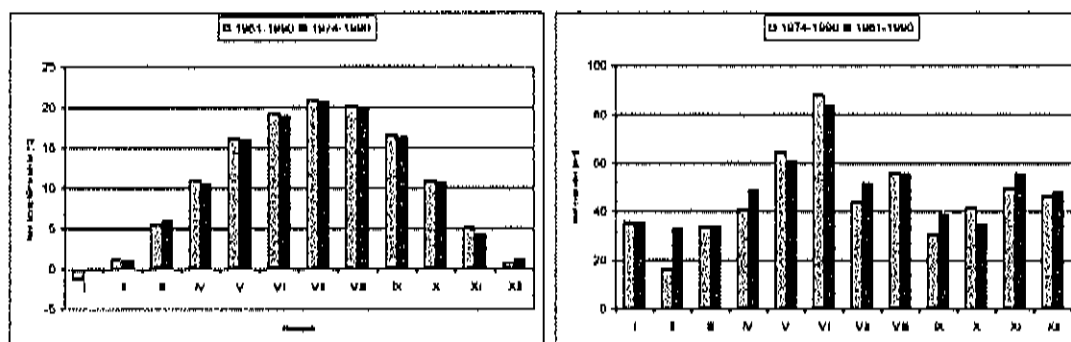
Az éghajlati forgatókönyvek az éghajlati elemek változását az 1961–1990. évek (bázis időszak) alapján jellemzett jelenlegi éghajlathoz viszonyítva adják meg. A vízhőmérséklet alakulása szempontjából döntő szerepet játszó léghőmérsékletnek, továbbá a csapadéknak a bajai mért adatok alapján számított havi jellemző értékeit az 1961–1990. évek átlagában a 4.5 táblázat foglalja össze. A nyári időszak (VI–VIII. hónapok) átlagos középhőmérséklete 20.2 °C, a csapadék 192 mm.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Év
Középhőmérséklet [°C]	-1.4	1.2	5.7	11.1	16.3	19.4	21.0	20.3	16.6	11.0	5.2	0.7	10.6
Csapadék [mm]	36	33	34	49	61	84	52	56	39	35	56	48	583

4.5 táblázat: Az 1961–1990 (bázis) időszak havi középhőmérséklet és csapadék értékei

Mivel vízhőmérsékleti adatok a jelenlegi éghajlatot jellemző 1961–1990. időszak egészére nem állnak rendelkezésünkre, csupán 1974–1990. évekből vannak (lásd korábban), a légköri- és vízhőmérsékletek észlelési idejének összehangolásából adódó szükségszerűség miatt a

jelenlegi éghajlatot a vízhőmérsékleti észlelések időszakával egyező 1974–1990. évek alapján írjuk le, de ennek jogosságát elsősorban a hőmérséklet, kiegészítésként a csapadékok alapján ellenőrizzük. Az ellenőrzés során összehasonlítjuk a teljes (1961–1990) és a csonka időszak (1974–1990) havi középhőmérséklet és a csapadék időszakra számolt átlagos értékeit (4.10 ábra).



4.10 ábra: A bázis (1961–1990) időszak és az 1974–1990 időszak átlagos havi középhőmérsékletének (baloldali ábra) és havi csapadékainak (jobboldali ábra) összehasonlítása

A hőmérséklet egyezése kiváló: a havi menet teljes mértékben egyezik a két időszakra, az egyes hónapok esetében az eltérés legfeljebb néhány tized fok, a nyári hónapok átlaga 30 év átlagában 20.2 °C, amittől a rövidebb (1974–1990) évek átlagos értéke 0.2 °C-kal tér el, értéke 20 °C. Valamivel rosszabb az egyezés a csapadék tekintetében. A havi csapadék éven belüli menete jól egyezik, de az egyes hónapokat tekintve nagyobb az eltérés. A hónapok felében az eltérés mintegy 5%, további öt hónapban 15-20%, az egyetlen február hónapban eléri az 50%-ot. A három nyári hónap átlagos csapadéka az 1974–1990 évek alapján 188 mm és csak 2%-kal kevesebb, mint a teljes időszakra jellemző 192 mm.

A hőmérséklet egészen kiváló, a csapadék alapvetően jó egyezése miatt a jelenlegi éghajlatot (és a jelenlegi vízhőmérsékleti állapotot) az 1974–1990. évek alapján jellemezzük.

#### 4.7 Éghajlati forgatókönyvek a vizsgált térségben

A vizsgált térségben a nyári évszakban 2030-ig 1.4 °C emelkedése várható a jelenlegi állapothoz képest. A NÉS-t felhasználva 2050-re ez további 0.5 °C, 2070-ig 1 °C emelkedést jelent. Ezt figyelembe véve éghajlati forgatókönyveinkben a nyári hőmérséklet 0.5–2.5 °C emelkedésével számolunk, és a megadott tartományon belül végzünk érzékenység vizsgálatokat.

Az éghajlati forgatókönyvek előállításánál következőképp járunk el. A bajai léghőmérséklet 37 éves adatsorát felhasználva az évek módszeres leválogatásával megkeressük azokat az éveket, amelyek átlagában a nyári időszak (VI-VIII. hónapok) középhőmérséklete a forgatókönyvben feltételezett növekedés mértékében tér el az 1974–1990. jelenlegi időszak nyári középhőmérsékletétől, azaz amelyekre a nyári középhőmérséklet rendre 0.5 °C, 1 °C, 1.5 °C, 2 °C és 2.5 °C értékkel magasabb az 1974-1990. évek jelenlegi értékénél. A jelenlegi éghajlatnál a háromhavi nyári időszak átlagos középhőmérséklete 20 °C, olyan éveket keresünk tehát, amelyek átlagában a nyári időszak középhőmérséklete 20.5, 21.0, 21.5, 22.0 és 22.5 °C, és törekszünk arra, hogy minél több év kerüljön be a leválogatásba. A leválogatás eredménye a 4.6 táblázatban található.

Forgatókönyvek Évek	0 °C	+0.5 °C	+1.0 °C	+1.5 °C	+2.0 °C	+2.5 °C
1974	1974	1974				
1975	1975	1975				
1976	1976	1976				
1977	1977	1977	1977			
1978	1978	1978				
1979	1979	1979	1979			
1980	1980	1980				
1981	1981	1981	1981			
1982	1982	1982	1982	1982		
1983	1983	1983	1983	1983		
1984	1984	1984				
1985	1985	1985				
1986	1986	1986				
1987	1987	1987				
1988	1988	1988	1988			
1989	1989	1989				
1990	1990	1990				
1991		1991	1991			
1992		1992	1992			
1993		1993	1993			
1994		1994	1994	1994	1994	1994
1995		1995	1995			
1996		1996				
1997		1997				
1998		1998	1998	1998		
1999		1999	1999			
2000		2000	2000	2000		
2001		2001	2001			
2002		2002	2002	2002	2002	
2003		2003	2003	2003	2003	2003
2004		2004	2004			
2005		2005	2005			
2006		2006	2006	2006		
2007		2007	2007	2007	2007	2007
2008		2008	2008	2008		
2009		2009	2009	2009	2009	
2010		2010	2010	2010	2010	
<b>Évek száma</b>	<b>17</b>	<b>37</b>	<b>19</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>3</b>

4.6 táblázat: A különböző éghajlati forgatókönyveket reprezentáló évek a múltból

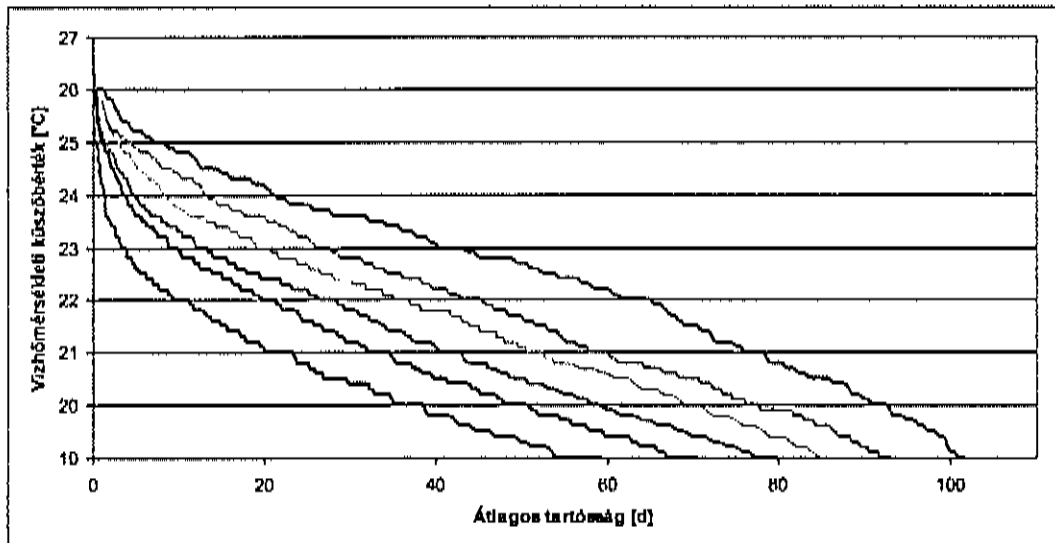
Példaképpen: az 1982–1983., 1994., 2000–2003. és 2006–2010. összesen 12 év leválogatásával kapott évek átlagában a nyári középhőmérséklet 21.5 °C, ami éppen 1.5 °C-kal magasabb a jelenlegi éghajlat 20.0 °C nyári középhőmérsékleténél. A leválogatott 12 év a nyári középhőmérséklet vonatkozásában akár a mainál 1.5 °C-kal melegebb éghajlat évei is lehetnének. Hasonló egyezés van más éghajlati forgatókönyvek esetében is. A táblázatból

látható, hogy a melegedés mértékének növekedésével erőteljesen csökken az új éghajlat időbeli analógia alapján lehetséges jellemzése, amíg pl. 1.5 °C-kal melegebb éghajlatot több mint 10 év alapján írhatunk le, addig a 2.5 °C-kal melegebb éghajlatot csupán három év alapján (lásd a táblázatot). A melegedés növekedésével csökken az új éghajlatnak a múltbeli időbeli analógia alapján történi leírásának a megbízhatósága.

#### 4.8 A vízhőmérséklet tartósságában várható változások

Feltesszük, hogy az új éghajlat(ka)t reprezentáló múltbeli évek alapján előállított vízhőmérsékleti tartóssági görbék az új éghajlatnak megfelelően jellemzik a vízhőmérsékletet. A vízhőmérsékleti tartóssági görbék előállíthatók az adott hőmérsékleti növekedéshez (azaz az új éghajlathoz) a 4.6 táblázat szerint leválogatott évek vízhőmérsékleti adatainak felhasználásával. A 1.5 °C melegedés esetén az új éghajlatra a vízhőmérsékleti tartósságok például az 1982–1983., 1994., 2000–2003. és 2006–2010. évek adatai alapján állíthatók elő.

A vízhőmérséklet tartóssági görbéket a melegedés 0 – 2.5 °C tartományában 0.5 °C lépcsőben végeztük el, az eredményt az 4.11. ábra mutatja be.

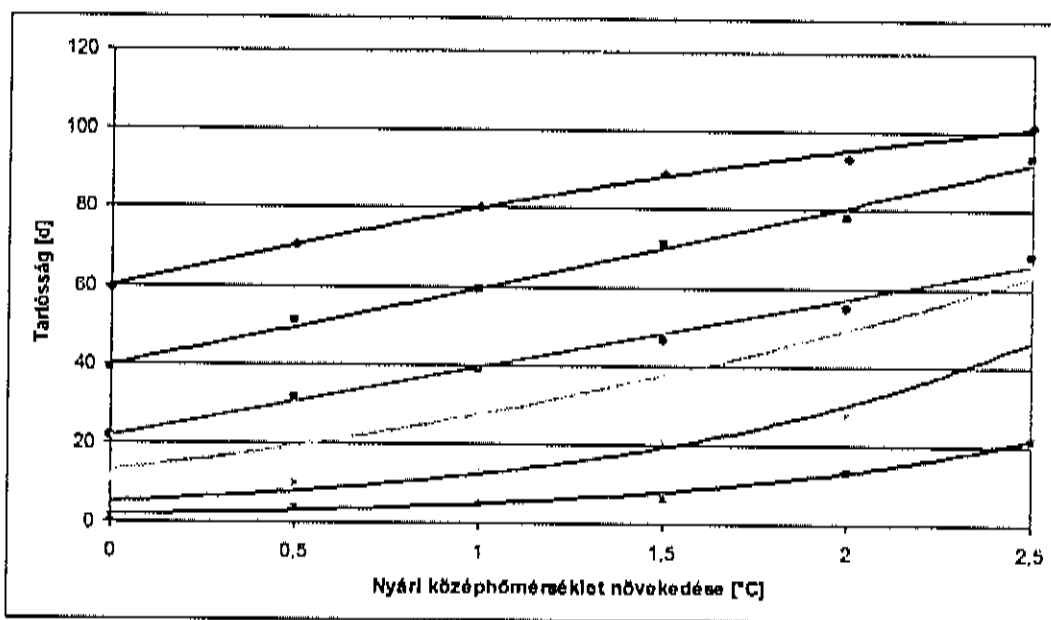


4.11 ábra: A vízhőmérsékleti tartóssági görbék változása a nyári középhőmérséklet különböző mértékű növekedését feltételezve  
 --- 0 °C, --- +0.5 °C, --- +1.0 °C, --- +1.5 °C, --- +2.0 °C, --- +2.5 °C

Az ábrából látható, hogy a tartóssági görbék a jelenlegi éghajlatot jellemző állapottól jobbra mozdulnak el annál nagyobb mértékben, minél nagyobb a melegedés<sup>11</sup>. A küszöbértékhez tartozó átlagos tartósság növekedésének mértéke az ábráról leolvasható, természetesen figyelembe kell venni, hogy a megbízhatóság csökken (i) a küszöbérték emelkedésével, (ii) a nyári középhőmérséklet növekedésével (a melegedés fokozódásával).

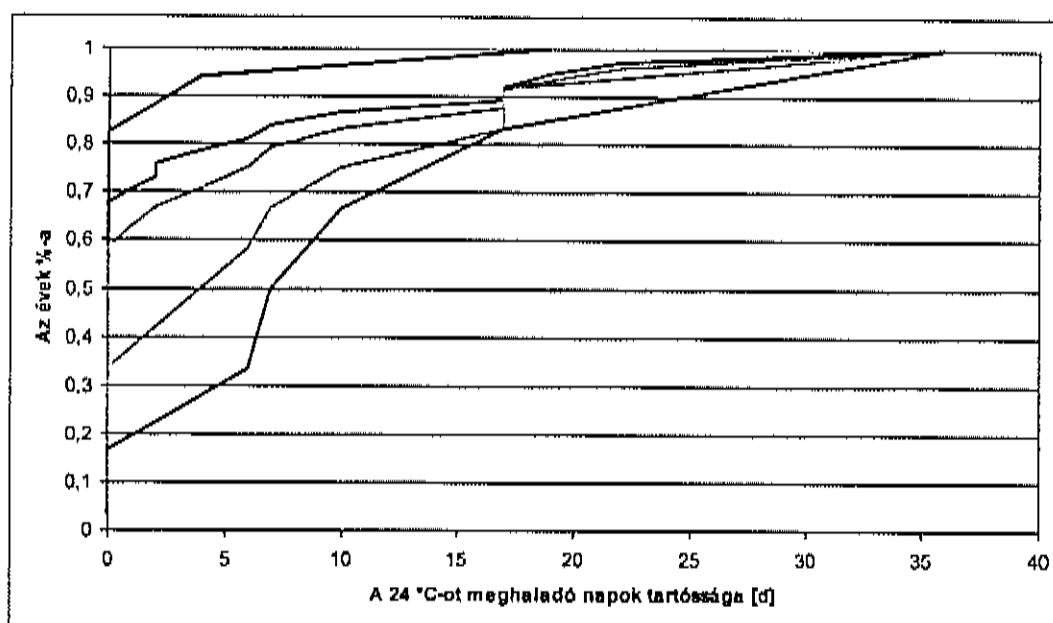
Az átlagos tartósság egyes küszöbértékekhez tartozó növekedését a melegedés fokozatának függvényében is ábrázoltuk (4.12. ábra).

<sup>11</sup> Az analógia módszere természetesen a múltban észlelt hőmérsékletnél magasabbat nem eredményezhet; ilyen szempontból a becslések inkább konzervatívak, mint túlzók.



4.12 ábra: A különböző hőmérsékleti küszöbértékeket meghaladó napok átlagos tartóssága a nyári középhőmérséklet növekedése függvényében  
A hőmérsékleti küszöbérték: --- 19 °C, --- 20 °C, --- 21 °C, --- 22 °C --- 23 °C, --- 24 °C

Végül a 4.13 ábra azt mutatja be, hogy az egyes éghajlatok esetén (fekete – jelenleg, kék 0.5 °C melegedés, türkiz 1.0 °C melegedés, narancssárga 1.5 °C, piros 2 °C melegedés) hogyan oszlik meg a 24 fokot meghaladó napok tartóssága az évek során. 24 választását az indokolta, hogy ez a legmagasabb hőmérséklet, amire a „jövő” adatsora még elfogadható hosszúságú.



4.13 ábra: A 24 °C-ot meghaladó napok tartósságának valószínűsége mai éghajlatra és az éghajlat különböző melegedése esetén

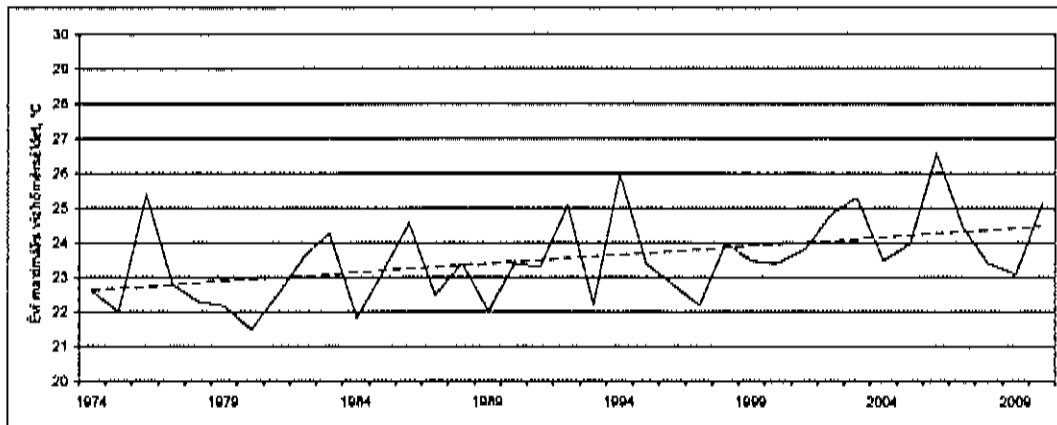
Például a fekete vonal a jelenlegi állapotot tükrözi. Jelenlegi éghajlatnál az évek mintegy 80 %-ában nem fordul elő 24 fokot meghaladó vízhőmérséklet, 95%-ában kevesebb, mint 4 nap. 1 °C melegedés esetén (türkiz) az évek csak 60%-ban nem fordul elő 24 fokot meghaladó

vízhőmérséklet, az évek 30%-ban meghaladja az 3 napot, 20%-ban a 7 napot, 10%-ban a közel 20 napot és szélsőséges esetben akár az egy hónapot is.

#### 4.9 Az évi maximális vízhőmérséklet és várható alakulása éghajlatváltozás esetén

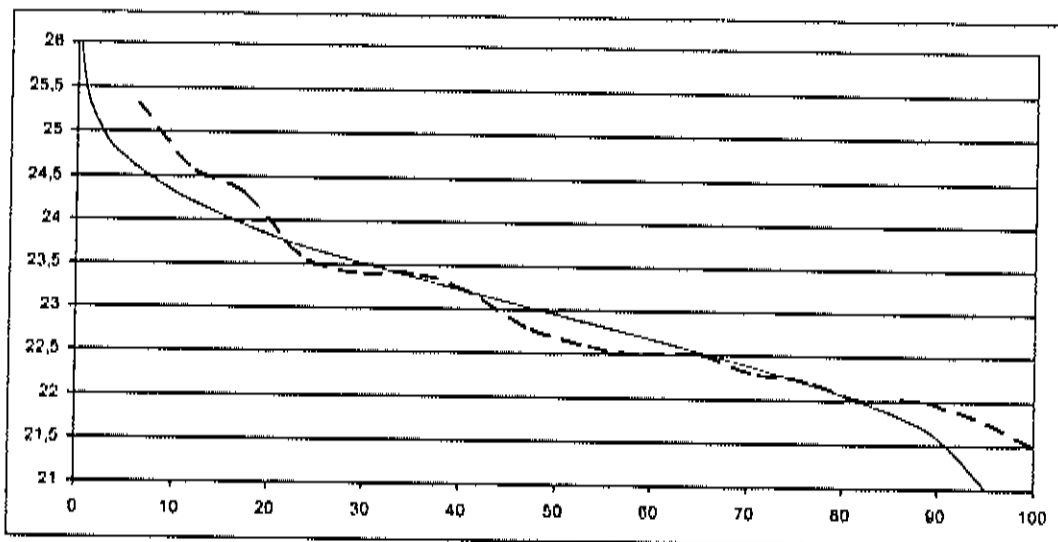
A hőterhelés szempontjából a legkedvezőtlenebb helyzetet minden bizonnyal a Duna maximális vízhőmérséklete jelenti. Így kérdés, hogy milyenek a trendek és mi mondható a jövőre vonatkozóan?

Az elmúlt 37 év megfigyelései növekvő tendenciát mutatnak a teljes, 1974–2010. időszakra (4.14 ábra).



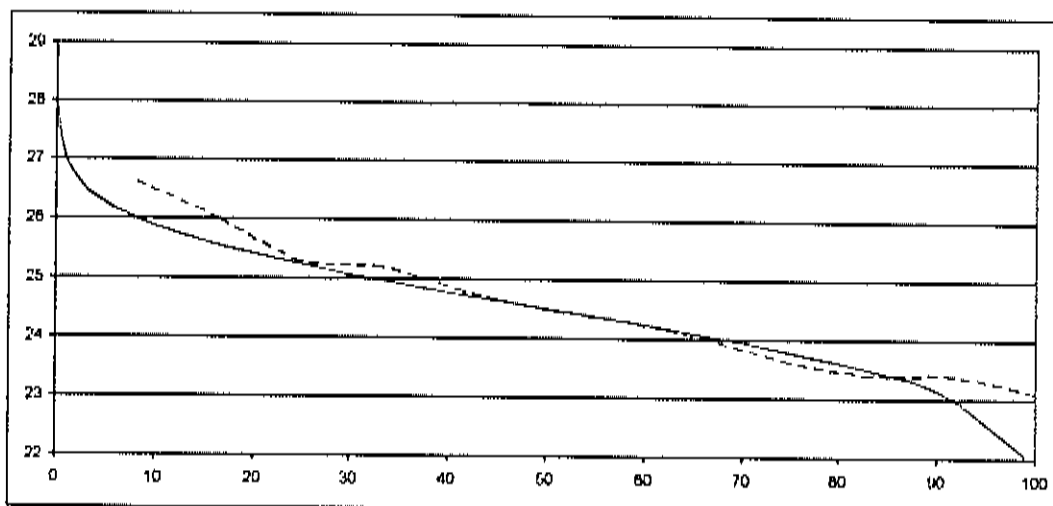
4.14 ábra: Az évi maximális vízhőmérséklet tendenciája 1974–2010 között

Az éghajlati hatásokra várható változások vizsgálatában a jelen állapotot, a tartóssági elemzéseknél követett eljáráshoz hasonlóan az 1974–1990. (bázis) időszak 17 évével jellemeztük. A maximális hőmérséklet változását a bázisidőszakban a következők jellemezték: középérték 22.9 °C, a szórás 1.07 °C, az ingadozás tartománya 21.5–25.4 °C, tágassága mintegy 4 °C. Az idősor rövidege miatt a magasabb momentumokhoz tartozó paraméterek csak erős bizonytalansággal számíthatók, ezért a 17 éves minta empirikus eloszlását normál eloszlással közelítettük, „simítottuk”. A maximális vízhőmérsékletek ritkán előforduló (alacsony meghaladási valószínűségű) tartományában az illeszkedés kevésbé jó (4.15 ábra).



4.15 ábra: Az évi maximális vízhőmérséklet empirikus és „elméleti, normál” eloszlása (jelen)

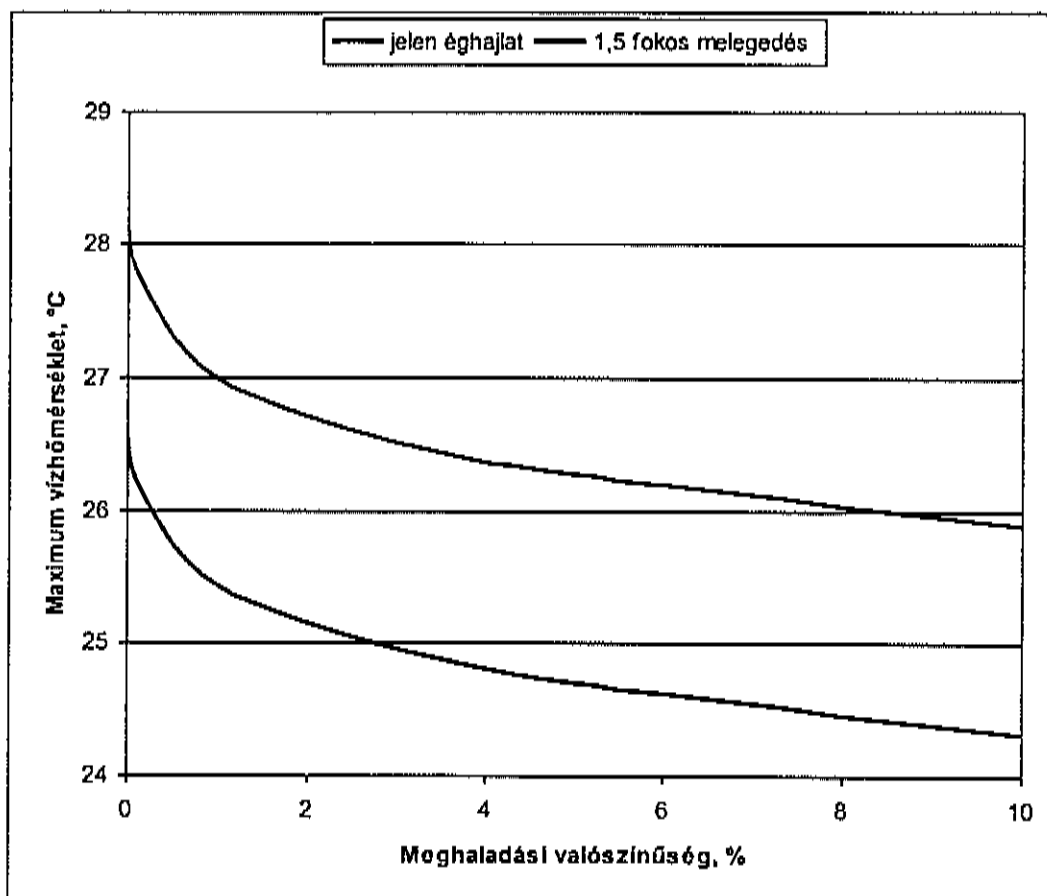
Vizsgáltuk, hogy a jelenlegi éghajlat  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  melegedése esetén miként változhat az évi maximális vízhőmérséklet eloszlása. A feltételezett éghajlatot 12 évből összeállított minta reprezentálja, ami erősen korlátozza a vizsgálat megbízhatóságát. A 12-elemű minta alapján a várható érték  $24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , szórása  $1.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , az ingadozás tartománya  $23.3\text{--}26.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tágassága  $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Az évi maximális vízhőmérsékletek empirikus eloszlását, a jelen éghajlathoz hasonlóan, normális eloszlással „simítottuk” (4.16 ábra).



4.16 ábra: Az évi maximális vízhőmérséklet empirikus és „elméleti, normál” eloszlása (1.5 fokos melegedés esetén)

A normális eloszlás-függvényeket grafikusán a meghaladási valószínűség 10% alatti tartományára a 4.17 ábra mutatja be.





4.17 ábra: Az évi maximális vízhőmérséklet eloszlása a jelen és a 1,5 °C melegedést feltételező éghajlatra

Az évi maximális vízhőmérséklet különböző valószínűségű (valószínűséggel meghaladott), a normális eloszlás-függvényről leolvasható értékeit a jelen és a 1,5 °C melegedést feltételező éghajlatra az 4.7 táblázat foglalja össze.

	99	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	3	1	0,1	0,01
<b>Jelen</b>	20,5	21,6	22,1	22,4	22,7	23,0	23,2	23,5	23,8	24,3	24,7	25,0	25,4	26,2	26,9
<b>1,5 fokos melegedés</b>	22,0	23,2	23,6	24,0	24,3	24,5	24,8	25,1	25,4	25,9	26,3	26,5	27,0	27,8	28,5

4.7 táblázat: Az évi maximális vízhőmérséklet eloszlása

A 4.7 táblázatból és a 4.17 ábrából levonható két fontos következtetés:

- A jelen éghajlati állapotra a rövid minta szerint észlelt legnagyobb évi maximum 25,4 °C nagyjából 1%-os meghaladási valószínűségű, azaz 100 évből egyszer fordul elő. Kisebb valószínűséggel ezt meghaladó maximális vízhőmérséklet előfordulhat csupán az éghajlat változékonyságából adódóan is. A múltban a legnagyobb maximális vízhőmérsékletet, 26,6 °C-ot 2006-ban, a jelen éghajlatot leíró 1974–1990. időszakon kívül észlelték, gyakorisága, az éghajlat változékonyságából adódóan 1000 és 10000 év között van.

- Az évi maximális víz hőmérséklet növekedése lényegében egyezik a léghőmérséklet emelkedésével. Az éghajlat 1.5 °C melegebbé válása esetén az 1 % meghaladási valószínűségű (100 éves gyakoriságú) évi maximális víz hőmérséklet 25.4 °C-ról 27.0 °C-ra emelkedhet. Kisebbségi valószínűséggel a maximális víz hőmérséklet ennél nagyobb mértékű, akár 28-29 °C-ra emelkedése sem zárható ki. A 30 °C-os maximális víz hőmérséklet bekövetkezése az éghajlat 1.5°C-os melegebbé válása esetén igen kevésbé valószínű, de ezt meghaladó melegedés esetén valószínűsége megnövekszik.

#### 4.10 Víz hőmérséklet és vízhozam

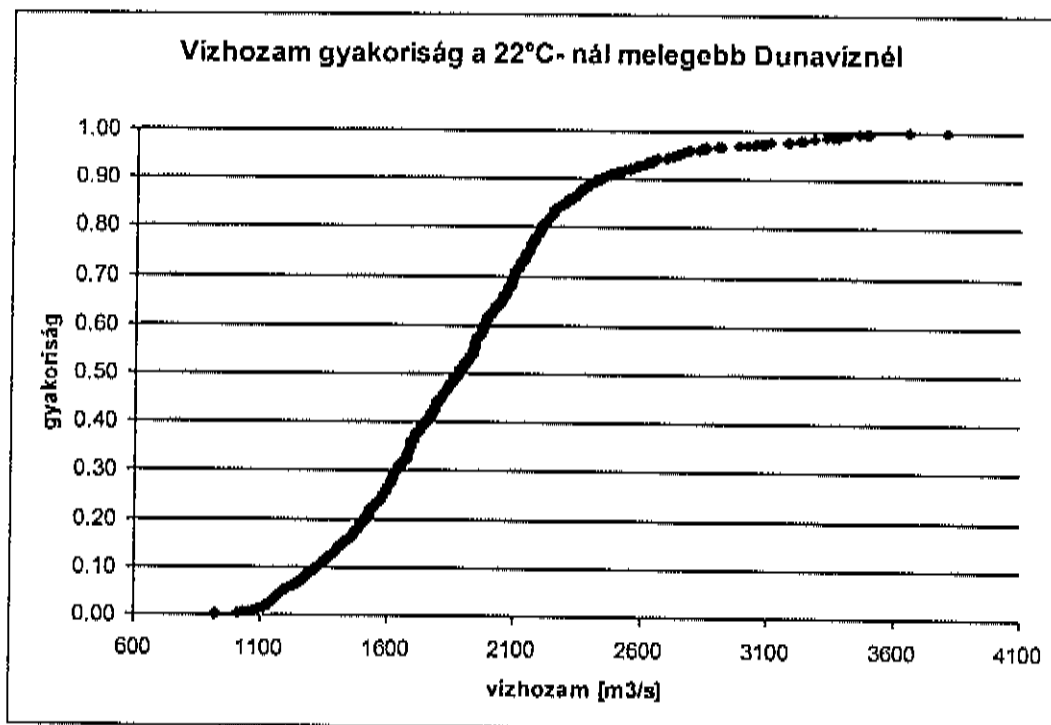
A tervezéshez mértékadó napok (ezeket egyelőre nem definiáljuk pontosabban) becslésére a hőmérséklet,  $T_h$  és vízhozam,  $Q$  adatokat elemeztük. Az adatsorok tulajdonságaitól alapvetően függ a hígulás és a megengedhető hőlépcső,  $\Delta T$  ( $30 + \Delta T_{ek} \geq T_h + \Delta T$ ), továbbá ezek kedvezőtlen értékeinek (kis hígulás és magas hőmérséklet) együttes előfordulása (ha van ilyen). A vizsgálatok alapján – a maximális hőmérsékletet követően – a következő, bevezető jellegű megállapításokat tehetjük  $T_h$  függvényében:

- 26 °C-ot meghaladó Duna víz hőmérséklet csak kétszer következett be (lásd korábban). Átlagát tekintve (37 évet figyelembe véve) évente 0.4 napot jelent<sup>12</sup> (4.8 táblázat). Ekkor az alacsonyabb, 8 °C-os hőlépcsőt feltételezve sem elégséges hatású az elkeveredés intenzifikálás nélkül: az eredmény határérték-túllépés;
- 24 °C alatti hőmérsékletekkel az év 99 %-ban kell számolni. Ekkor 8 °C-os hőlépcső esetén elegendően hatékony az elkeveredés, de 11 °C-os hőlépcsőt feltételezve, a bevezetés módjától függően, akadályba ütközhet a határérték betartása;
- Ahogyan már említettük, a kis hozamok ( $Q < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) előnyösen nem esnek egybe a dunai hőmérsékleti csúcsokkal: míg a hőmérséklet maximuma nyári hónapokban várható, addig a Duna vízhozam minimumok kora őszi jelentkezők;
- 22 °C-ot meghaladó hőmérséklet évente átlagosan már valamivel több, mint 20 napot érint. Ekkor a Duna vízhozama 90 %-ban kis- és középvízinek tekinthető.

$T_h$	Napok száma (éves átlag)	$Q > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$
> 22 °C	22.6	9%	1%
> 23 °C	11.8	4%	2%
> 24 °C	4.7	4%	3%
> 25 °C	1.7	5%	2%
> 26 °C	0.4	0	0

4.8 táblázat: Adott hőmérsékletet meghaladó dunavíz-hőmérsékletek és vízhozamok gyakorisága

<sup>12</sup> Az adatsorból látszik, hogy, 1994-ben 4 napig, 2006-ban 9 napig volt legalább 26 °C, korábban pedig soha.



4.18 ábra: Vízhhozam gyakoriság a 22 °C-nál melegebb Duna esetében

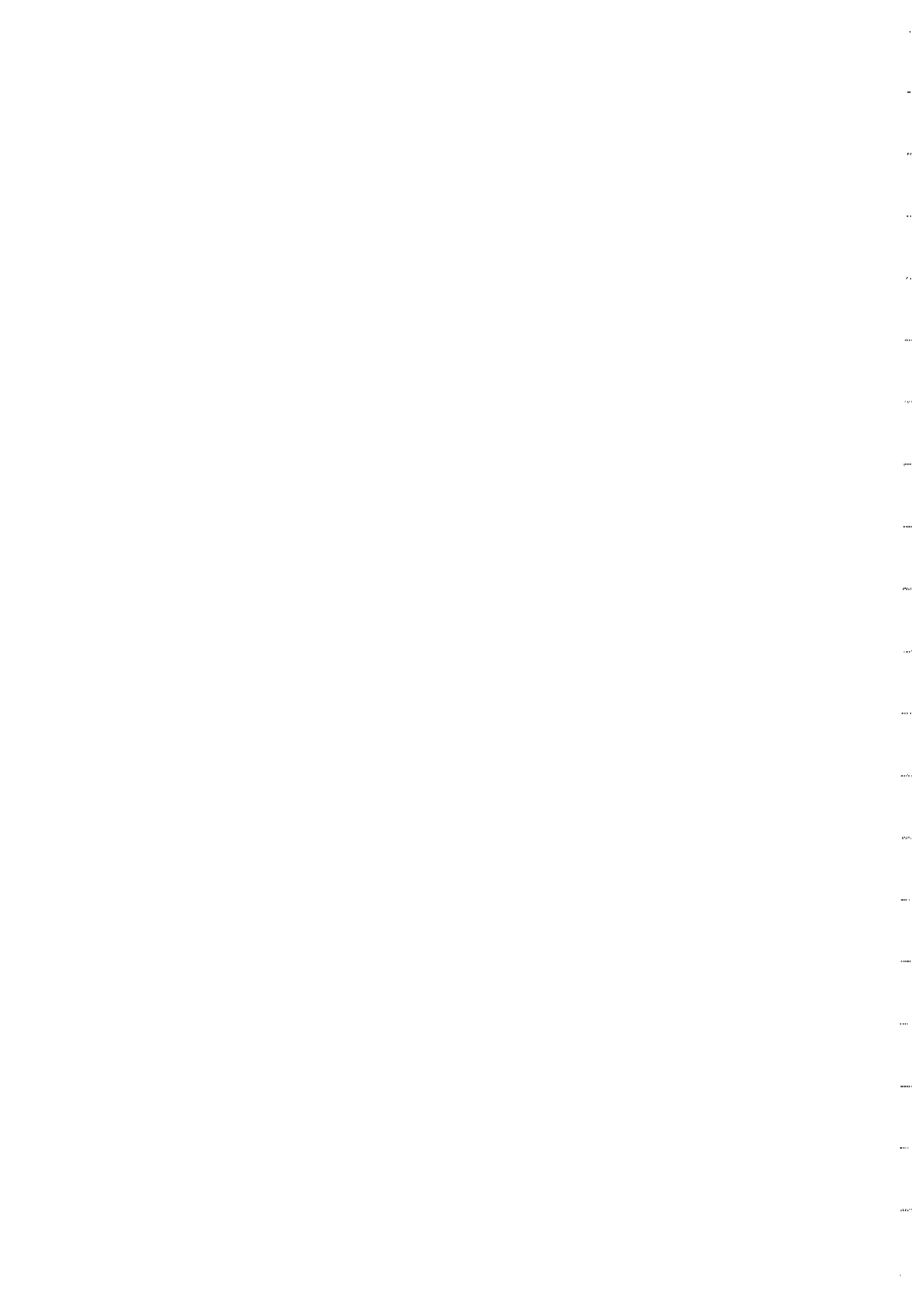
A 4.18 ábra is alátámasztja, hogy a melegebb háttérhőmérséklet főleg az 1300 - 2200 m<sup>3</sup>/s vízhozamokhoz tartozik (az 50 %-os gyakoriság értéke 1880 m<sup>3</sup>/s). Ahogyan a 6. fejezetben látható lesz, a hígulás hatása a változó sebességterek miatt egy ehhez közeli sávban eszketten, azaz egyetlen kritikus állapotot jellemző (hőmérséklet; vízhozam) adatpár helyett elsődlegesen a  $T_h \geq T_0$  feltétel adható meg, ahol például  $T_0 = 22$  °C esetében,  $\Delta T = 8$  °C mellett a kilépő szelvényben 30 °C mérhető.  $Q$  hatása az egybeesések (múltbeli) hiánya miatt egyelőre másodlagosnak tekinthető, az  $1300 \leq Q \leq 2200$  m<sup>3</sup>/s tartományban nem monoton.

A jelenleg érvényes környezeti előírás szerint (lásd korábban is)

$$30 \text{ °C} + \Delta T_{\text{elk}} \geq T_h + \Delta T,$$

ahol  $T_h$  erősen éghajlatfüggő. Így a kérdés az, hogy figyelembe véve a szóba jövő hűtővíz hozamát, az elkeveredés intenzifikálásával (diffúzor-sor alkalmazásával) a jelenlegi hőmérsékleti korlát kielégítése  $T_h$  lehetséges tartományában megoldható-e és ha igen, mennyiért? A feltett kérdésre a választ a 6. fejezetben adjuk meg.

A mértékadó állapot vagy állapotok kijelölése szempontjából fontos lehet a magas hőmérséklet és a kis (vagy valamilyen kitértetett) vízhozam egybeesésének elemzése. A magasabb hőmérsékletű víz a nyári hónapokban, június-augusztus időszakban fordul elő, ritkán áthúzódva szeptember első felére. A Duna kisvizei, felső szakaszán a magashegységi éghajlatnak köszönhetően, az őszi-téli hónapokra tolódnak el, jellemzően november-január hónapokban fordulnak elő. A víz hőmérséklet éven belüli alakulása és a vízjárás sajátossága következtében a magas hőmérséklet és az alacsony vízhozam kivételesen találkozik időben egymással. Ezt a jelen vizsgálat is alátámasztja (4.9 táblázat; itt az 1100 illetve 1200 m<sup>3</sup>/s alatti vízhozamoknak a 22 °C feletti víz hőmérséklettel előfordult egybeesését is vizsgáltuk).



	Q < 1100 m <sup>3</sup> /s	Q < 1100 m <sup>3</sup> /s T > 22°C	Q < 1200 m <sup>3</sup> /s	Q < 1200 m <sup>3</sup> /s T > 22°C
1974	0	0	0	0
1975	0	0	0	0
1976	0	0	12	12
1977	0	0	0	0
1978	0	0	0	0
1979	0	0	0	0
1980	0	0	0	0
1981	0	0	0	0
1982	0	0	0	0
1983	33	0	63	0
1984	0	0	2	0
1985	6	0	11	0
1986	0	0	19	0
1987	0	0	0	0
1988	0	0	0	0
1989	0	0	3	0
1990	0	0	3	0
1991	0	0	25	0
1992	13	0	47	10
1993	0	0	0	0
1994	0	0	11	0
1995	0	0	0	0
1996	0	0	0	0
1997	0	0	3	0
1998	0	0	0	0
1999	0	0	0	0
2000	0	0	0	0
2001	0	0	0	0
2002	0	0	0	0
2003	0	0	4	4
2004	0	0	0	0
2005	0	0	0	0
2006	0	0	16	0
2007	0	0	4	0
2008	0	0	0	0
2009	0	0	0	0
2010	0	0	0	0

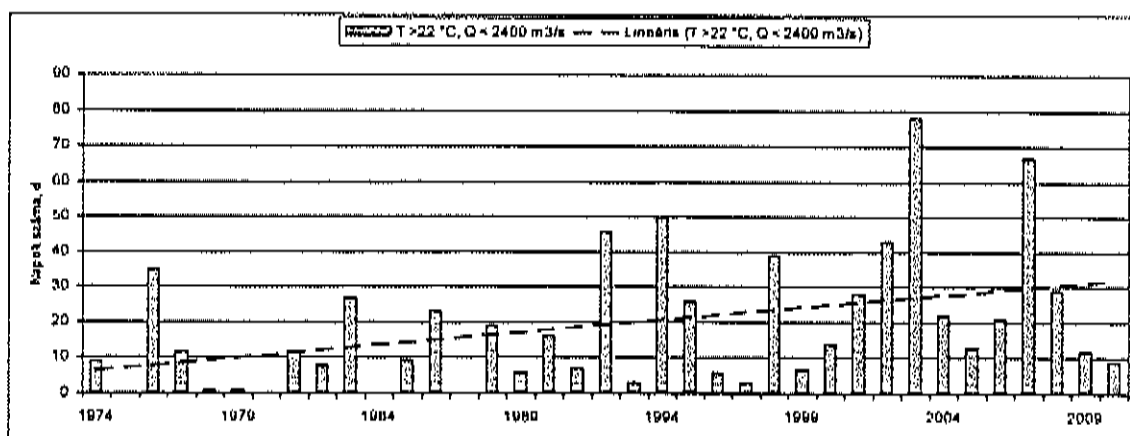
4.9 táblázat: Az 1100 illetve 1200 m<sup>3</sup>/s-nál kisebb vízhozamú és a 22 °C-nál magasabb hőmérsékletű napok egybeesésének gyakorisága

A 37 év során 52 nap (a napok 0.4%-a) volt, amikor a vízhozam 1100 m<sup>3</sup>/s, és 223 nap (a napok 1.6%-a), amikor 1200 m<sup>3</sup>/s alatt maradt. Az alacsony vízhozamú napok többnyire, a Duna vízjárásának megfelelően, a téli félév hónapjaira, főleg november-december hónapokra estek, ritka kivétellel a nyári hónapokra. A magas vízhőmérsékletű és alacsony vízhozamú napok egybeesése igen kivételes. Az 1100 m<sup>3</sup>/s vízhozamú napok az elmúlt 37 évben egyszer sem találtak 22 °C-ot meghaladó vízhőmérséklettel (lásd a 4.9 táblázat 3. oszlopát). Az

1200 m<sup>3</sup>/s vízhozamú napok között is mindössze 26 ilyen nap akadt három évben (1976, 1992 és 2003-ban). A kérdéses napok száma 0.2%-a körüli.

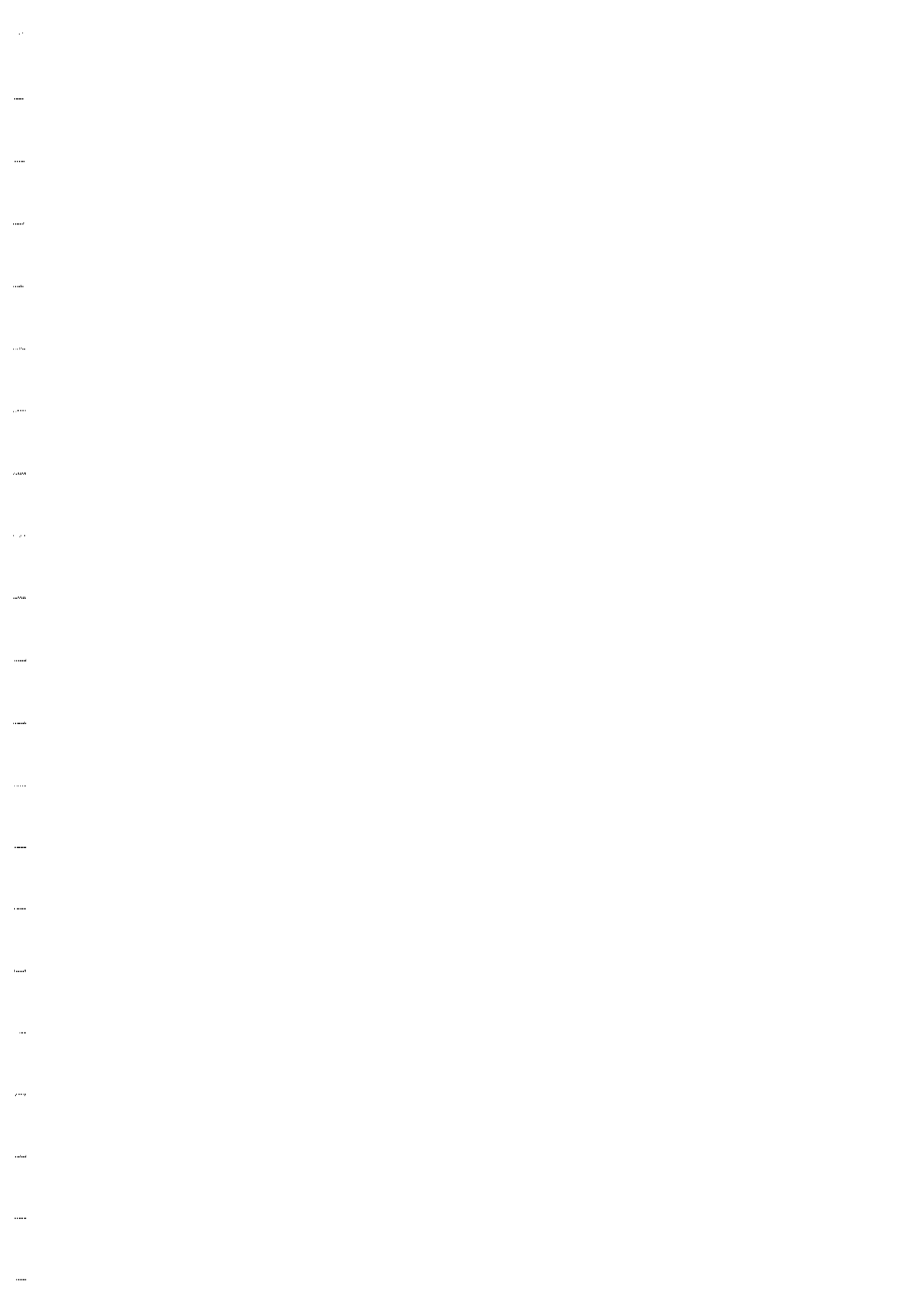
A mértékadó napok feltárása érdekében az 1974–2010. évekre vizsgáltuk azon napok együttes évenkénti elfordulását is, amikor a hőmérséklet nem kisebb 22 °C-nál ( $T \geq 22 \text{ °C}$ ), a vízhozam viszont kisebb 2400 m<sup>3</sup>/s-nál ( $Q < 2400 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Ebben az időszakban 774 olyan nap fordult elő (5.6 %), amikor víz hőmérséklet legalább 22 °C ( $T \geq 22 \text{ °C}$ ) volt. Az ilyen víz hőmérsékletű napok jellemzően június közepe és augusztus vége között jelentkeztek (a napok száma az egyes években eltérően alakult). A 774 napból 701 napon – a napok 5.2 %-ában – a vízhozam ennél kisebb volt. A  $T \geq 22 \text{ °C}$  és  $Q < 2400 \text{ m}^3/\text{s}$  értékekkel jellemzett napok évenkénti alakulását (évenkénti napok száma) a 4.19 ábra mutatja. Az ábra szerint az ilyen napoknak a száma emelkedő tendenciájú.

A kritikus napokat alapvetően a magas víz hőmérséklet határozza meg. Mint látjuk, ez a kis vizek mellett alig fordul elő, inkább a kis-közepes tartományban található. Az egyik legfontosabb konklúzió a 4.19 ábra, amely a fentiekben definiált napok számának az elmúlt évtizedekben tapasztalt növekedését mutatja. Az igazolható növekedés, továbbá a forgatókönyvek alapján várható víz hőmérséklet változások azt a következtetést engedik meg, hogy az elkövetkező évtizedekben a növekedés inkább folytatódik, és a 2400 m<sup>3</sup>/s alatti, de 22 °C feletti napok számának - akár jelentős - növekedése várható.



4.19 ábra: A mértékadónak definiált napok számának alakulása 1974-2010. között

Összefoglalóan az mondható, hogy a magas hőmérsékletek előfordulása és tartóssága nő, a maximális víz hőmérséklet pedig a jövőben meghaladhatja a 27 °C-ot.



## 5. KÖRNYEZETI HATÁSOK ÉS SZABÁLYOZÁSOK

### 5.1 Az FVR rendszerek környezeti hatásai

A környezeti hatásokról általánosan elfogadott, hogy FVR rendszerekre nagyobbak, mint tornyos megoldásokra, ugyanakkor előbbiek energiatermelése hatékonyabb. Valamely konkrét esetben az egyes hatások részletes elemzése elkerülhetetlen ahhoz, hogy pontosan képesek legyünk a különböző hűtési módokat összehasonlítani.

A hetvenes években komolyak voltak az aggodalmak a hűtőrendszerek és azon belül különösen az FVR rendszerek vízminőségi és ökológiai hatásaival kapcsolatban. Ezek az aggodalmak azonban nem teljesültek, aminck egyik magyarázata az, hogy a telepítések nagy hígulási képességgel rendelkező helyekre történtek, ahol főként csak lokális változások érvényesültek.

A fő aggodalmat a halpopulációk sérülékenysége jelentette. A tapasztalatok azonban – beleértve a dunaiakat is – azt mutatják, hogy a hűtőrendszerek a halakat csak kismértékben befolyásolják<sup>13</sup>: (i) az okozott mortalitás, amit az ütközés és a magával ragadás okoz többnyire kicsiny, (ii) a magas szaporítási képesség helyettesíti az elpusztult egyedeket. Mozgékony vízi élőlények alkalmazkodnak a hő gradienshez és általában pozitívan reagálnak az élőben részesített körülményekre.

A hatások káros volta sokak által vitatott kérdés. Ezeket laboratóriumi körülmények között sikerült bemutatni, azonban helyszíni monitoring programok korlátai között a mérések ritkán azonosították őket (Reynolds 1980). Az elemzések azt sugallják, hogy FRV rendszerek nem befolyásolják számottevően kedvezőtlenül a halpopulációkat (lásd Szilágyi 2007 a Tisza esetére). Reynolds ironikusnak nevezi, hogy minél kisebb a valószínűsége a jelentős hatásnak, annál nehezebb a detektálás. Ugyanakkor a hatások többnyire reverzibilisek és a halmortalitás jelentősen, költség-hatékonyan csökkenthető megfelelő technológiák révén. Ezek a vízkivételek környezetében az ütközés és a magával ragadás hatásának minimalizálását szolgálják. Az eljárások magukba foglalják a fizikai akadályokat a halak hűtővíz rendszerbe bejutásának megakadályozására szolgáló rácsokat, öblítő szerkezeteket, az átjárhatóság biztosítását, forgó rácsokat a halak begyűjtésére és visszajuttatására, elterelő rendszereket, különböző finom hálókat stb.

Az FVR rendszerek vízi környezetre gyakorolt hatása két nagy csoportba sorolható (lásd például Nájjar et al 1979): (i) az élőlények ütközése és magával ragadása a vízkivételnél, és (ii) biológiai, kémiai és fizikai hatások, amelyek a csóvában a felmelegedett víz jelenlétéből származnak.

A magával ragadás utat teremt a viszonylag kicsiny élőlények (ikrák, lárvák stb.) számára a kondenzátoron keresztül. A mortalitás elsősorban a hűtőrendszeren belüli hő-, fizikai- és kémiai hatásra vezethető vissza. A magával sodort élőlények mennyisége a vízkivétel kialakításának és helyének, továbbá a kondenzátor hozamának a függvénye. A nektonikus fajok és bentikus rákok rácson való ütközését az áramlás által kifejtett erő idézi elő. A jelenség a befogadóban lévő élőlények korának és eloszlásának, a vízhozamnak, a vízkivétel környezetében kialakuló sebességnek és az átáramlási időnek a függvénye. A vízkivétel szempontjából az lenne az előnyös, ha a hűtővíz hozama és sebessége alacsony lenne (ez

---

<sup>13</sup> Ez a hatás nagyobb például a planktonikus élőlényközösségekre.



magas  $\Delta T$ -t illetve nagy műtárgyat kívánna), a visszavezetés pedig minimalizálná a levonulási időt a csóvában.

A bevezetésnél elsősorban a csóva magával ragadása fejt ki hatást, ami viszont tervezés kérdése. Az élőlények a magasabb hőmérsékletre általában megnövekedett metabolizmus rátával, a toxikus anyagokkal szembeni csökkent ellenállással és nagyobb oxigénigénnyel reagálnak. Általában a hő-sokk kapja a legnagyobb figyelmet, de a fizikai és a kémiai sokk is fontos lehet. Gyakoriak a „bioassay” vizsgálatok, amelyeket a vízkivétel és -visszavezetés hatásainak elemzésére egyaránt használnak. A hatások nagyban függenek az erőmű környezetében található vízi környezettől és ezért a kívánatos terv helyről-helyre változik. A vízkivétel hatása szempontjából a kis hozam (és sebesség) részesítendő előnyben, azonban a másik oldalon pontosan fordított a helyzet: a nagy hozam biztosít alacsonyabb hőmérsékletnövekményt és kisebb hatást. Ily módon a kondenzátor hűtővíz hozamának megválasztása kompromisszum kérdése, amelynek célja az együttes hatás minimalizálása.

A csóva hőmérséklete alapvetően függ a visszavezetés tervezésétől. A legegyszerűbb megvalósítás – kis sebességű felszíni bevezetés – nem biztosítana elegendő elkeveredést és így viszonylag magas felszíni hőmérsékletet eredményezne. A másik oldalon valamely a mederre fektetett, (multi-port) diffúzor gyors elkeveredés révén alacsony hőmérsékletnövekményhez vezetne, de nagy mennyiségű víz megmozgatása révén. Ily módon az expozíciós idő sok tényezőtől függ: kis térfogatok megmozgatása (rövid expozíciós idő) viszonylag magas hőmérséklet mellett és nagy térfogatok alacsony hőmérséklettel párosulva képezik a megoldások két nagyobb kategóriáját, a helyviszonyok függvényében.

Az USA nukleáris erőmű engedélyének megújításához szükséges általános környezeti hatásvizsgálat (NUREG-1437, Vol.1, 2010) főbb tételeit az 5.1 táblázat tartalmazza, ami jó tájékoztatást ad a lehetséges hatásokról<sup>14</sup>. A NUREG felmérések komoly hatásról nem számolnak be.

Hatások meglévő FVR nukleáris erőművek engedélyének megújításához	Hatás
<b>A. Vízhinőség, hidrológia, vízhasználat</b>	1
Vízhasználati konfliktusok	1
Megváltozott áramlások (vízkivétel és visszavezetés)	1
Megváltozott só-koncentráció gradiens	1
Hordalékszállítás változása	1
Rétegződés tavakban	1
Erozio	1
Eutrofizálódás	1
Klór és egyéb csiraölők kibocsátása	1
Fémek kibocsátása szennyvízzel	1
<b>B. Vízi ökológia</b>	
Nagyobb halakra, kagylókra gyakorolt hatások	2
Korai életstádiumban lévő hal és kagyló; rákfélé sérülése a hűtőrendszerben	2
Fitoplankton, zooplankton	1
Hőterhelés hatásai	2

<sup>14</sup> Az USA NUREG eljárása a tornyokra részben lefedi az 5.1 táblázat elemeit. Ezeken túl vizsgálni kell a hatásokat a szárazföldi ökológiára, az emberi egészségre és a madarak útközésére a hűtőtoronnyal.

Hatások meglévő FVR nukleáris erőművek engedélyének megújításához	Hatás
Hidegsokk	1
Vándorló halak	1
Vízi élőlények eloszlása	1
Kedvezőtlen fajok megjelenése	1
Gáz túltelítés (gázbuborék betegség)	1
Alacsony DO	1
Szennyezők felhalmozódás az üledékben vagy a biótában	1

5.1 táblázat: Hatások meglévő FVR nukleáris erőművek engedélyének megújításához

1 – csekély hatás a teljes hatásterületen,  
2 – mérsékelt vagy nagy hatás néhány helyen

## 5.2 A környezeti hatások összehasonlítása

A frissvízhűtésű és tornyos hűtések összevetését az irodalom alapján az 5.2 táblázat tartalmazza (lásd Najjar et al 1979, Reynolds 1980, NUREG 2010 és az IPPC jogszabály).

Hatás	Hűtővíz rendszer	Frissvízhűtés	Nedves hűtőtorny	Megjegyzés
1. Mennyiség		Nagy vízhozam	Általában kicsiny, 10 % körüli	Általában nagy a hígítás
2. Vízfogyasztás (párolgás)		1	~ 2x (2-3 %, 1-3 m <sup>3</sup> /s/1000 MW)	Vízhiányos területek?
3. Hőhatás		Potenciálisan nagy	Kicsiny	Hősokk, fizikai, kémiai, biológiai folyamatok
4. Vízkivételi hatás		Potenciálisan nagy	Kicsiny	Élőlények ütközése, magával ragadás
5. Vízszennyezés		Csekély	Potenciálisan nagy	Pótvíz, biocid, toxikus anyagok, tisztítás, hulladék elszállítás
6. Vízminőség		Helyfüggő	Kisebb	
7. Vízi élővilág		Helyfüggő	Kisebb	Halakra a természetben nem mutattak ki komoly kedvezőtlen hatást, Pakson sem
8. Legionella betegség		Nincsen	Lehet	Közeli telepítés. Biocid. Nem kellően feltárt
9. Légszennyezés		Nincsen	Potenciális szennyezés: talaj, növényzet	
10. Ködképződés, csóva, lefagyás		Elhanyagolható	Általában nem nagy, vízgőzcsóva	Magas bevezetés. Láthatóság?
11. Zaj		Kicsiny	Kellemetlen lehet	
12. Esztétika		Általában kicsiny	Magas létesítmény	Tájkép?
13. Terület igény		Viszonylag kicsiny	Nagy	

Hatás	Hűtővíz rendszer	Frissvízhűtés	Nedves hűtőtorny	Megjegyzés
14. Telepítés		Nagy folyó mellett	Településtől távol. Pótvíz igény	
15. Földrengés		Csekély	Nagyobb	Előírások felülvizsgálata? Tűzveszély?

5.2 táblázat: FVR és THNH hűtőrendszerek környezeti hatásai

A frissvízhűtésű rendszerek sokkal több vizet mozgatnak meg, mint a tornyos megoldások és ezzel függenek össze a potenciálisan komoly vízkivételi-, hő- és vízminőségi hatások, amelyeket a nagy hígulás a legtöbb esetekben (Paks térségében is) mérsékel. Ugyanakkor a tízed akkora vízigényű nedves hűtőtornyok vízfogyasztása párolgás révén kétszerese az FVR-nek, ami vízhiányos területeken fokozhatja a stresszhelyzetet és a konfliktusokat. A többi hatás közül negatívként a hűtőtornyokban alkalmazott biocidok (klór és származékai, például halogénezett szerves vegyületek) és a nem párolgó bedúsult anyagok emelendők ki, amelyek lebomlási (felvezési) ideje roppant eltérő lehet. Ma már csak engedélyezett összetételű biocidok alkalmazhatók, előírva a maradék anyag koncentrációt és az alkalmazás időtartamát. Aggodalmak a hosszú távú hatással kapcsolatban jelentkeznek.

A THNH megoldás jellemzője a partikulált anyagok potenciális kibocsátása a légkörbe, a nagy lábnym, ami élőhely és mezőgazdasági terület elvonását eredményezheti, a zaj-, és az esztétikai hatás (200 méter magas műtárgyakról van szó), ami csökkenti a rekreációs- és tájkép értéket. A vízgőzesóva többelhatást okozhat és kóddhatással bírhat, lefagyást eredményezhet. A japán balesetet követően kiemelt, vizsgálandó kérdés a földrengésbiztonság.

Az 5.2 táblázat csupán minőségi összehasonlítást tartalmaz; valamely konkrét esetben az elkerülhetetlen a hatásvizsgálaton alapuló, a helyi viszonyokat tükröző részletes elemzés és összevetés.

### 5.3 Hűtővíz-kivételi művek jogi szabályozásának története az USA-ban

Az USA szabályozása két pillérre épül: (i) nemzeti ajánlások az államok számára élőlényfüggő határértékek megállapítására (ezt a Clean Water Act, CWA – Tiszta VíZ Törvény – 316(a) paragrafusára írja elő, lásd később) és (ii) a vízkivételi művek kialakításának előírása. A jogszabály, NEI (2010) nyomán az alábbiak szerint foglalható össze.

1972 - A kongresszus elfogadta a CWA 316(b) paragrafusát a hűtővíz kivételi művek szabályozásáról. A törvény előírta, hogy "a hely, a tervezés, a kialakítás, és a kapacitás a legjobb elérhető technológiát (BAT) tükrözze a káros környezeti hatások minimalizálása érdekében", azaz hogy a vízkivétel által potenciálisan befolyásolt élőlények számára a maximális védelmet biztosítsák.

<sup>13</sup> Ezek túlnyomóan kisebb jelentőségű hatások.

- 1977 - A szövetségi bíróság felülvizsgálatra visszaküldte az EPA-nak a hűtőrendszerekről szóló azon szabályozását, amely hely-specifikus döntéshozatalt kívánt. Az EPA később visszavonta a szabályozást ahelyett, hogy egy felülvizsgált változatot bocsátott volna ki. Az EPA hatályban hagyott egy olyan rendelkezést, ami az állami engedélyező hatóságokra bízta, hogy a "legjobb elérhető technológiát" minden egyes létesítményre, egyedi elbírálás alapján "legjobb szakmai megítélésük" szerint határozzák meg.
- 1977 - EPA „útnutatót” adott ki, amely tartalmazta, hogy mely irányvonalak alapján szükséges a vízi élővilágra gyakorolt hatást, és a negatív hatásokat minimalizáló intézkedéseket meghatározni. Ezt a vizsgálatot minden esetben az építés időszakában kellett elvégezni. A megközelítés – amely lehetővé teszi a hely-specifikus elemzést – több, mint 30 évig volt hatályban.
- 1995 - Egy környezeti csoportok közötti per következményeképpen EPA belekényszerült a 316 (b) törvény szerinti több-lépcsős eljárásba.
- 2001 - EPA kiadta az új erőművekre vonatkozó I. fázisú szabályozást, amely nemzeti szinten a hűtőtornyos rendszert nyilvánítja a legjobb elérhető technológiának (BAT).
- 2004 - EPA kiadta a meglévő erőművekre vonatkozó szabályozást is (II. lépcső). A szabályozás célja az ütközések és a magával ragadások csökkentése a vízkivételnél, a hűtőtornyokban megfigyelt pusztulási arányokon alapuló nemzeti határértékeket határozva meg. A II. fázis ezen túl egy sor akkreditált technológiát is megadott, a hűtőtornyokon túl. Mítigációs stratégiaként szintén figyelembe vett rehabilitációs intézkedéseket. Ami a legfontosabb: megengedte a hely-specifikus döntéshozást, költség-haszon elemzés alapján.
- 2007 - A szövetségi fellebbviteli bírósági eltörölte mind a költség-haszon elemzésen alapuló hely specifikusság, mind pedig a rehabilitáció lehetőségét. Továbbá, a fellebbviteli bíróság utalt rá, hogy EPA foglalkozzon komolyan azzal a lehetőséggel, hogy a frissvízhűtésű rendszereket hűtőtornyosra alakíttassa át.
- 2009 - Az Egyesült Államok Legfelsőbb Bírósága felülvizsgálta a fellebbviteli bíróság határozatát, és megállapította, hogy az EPA megengedheti a költség-haszon elemzést, de nem teheti kötelezővé. A Bíróság más szempontból nem tért ki az alacsonyabb szintű bíróság döntésére.
- 2010 - EPA várhatóan hamarosan kiad egy módosított szabályozást véleményezésre.

A felvázolt folyamat eredményeként a jelenlegi helyzetet az jellemzi, hogy frissvízhűtésű rendszert a gyakorlatban szinte nem lehet jóváhagyni (hacsak az nem biztosít a hűtőtornyos változattal egyenértékű áramlási feltételeket a kivételnél). Hasonló a tendencia sok más országban, így az Egyesült Királyságban is (Turnpenny and Lincy 2010).

#### 5.4 Határértékek nemzetközi áttekintése

A hőmérsékleti határértékek előírása sok országban hasonló, azonban az eltérések is jelentősek. Az általános tendencia a korlátok szigorítása, amit az USA-ban az 5.3 pont, Európában pedig a VKI, az EU egységes víz politikája fejez ki. Utóbbi a(z ökológiai és kémiai) jó állapot elérését tűzi ki célként, 2015-re illetve kétszer 6 évvel meghosszabbítva, legkésőbb 2027-re.

A leggyakrabban használt előírások a következők:  $T_{\max}$  a befogadóra és/vagy annak valamely kitüntetett helyére (sokszor egyedi határértékként),  $\Delta T_{\max}$  a hőlépcsőre (gyakran nyári és magasabb téli értéket is előírnak). További lehetőségek:  $T_{\max}$  és  $\Delta T_{\max}$  a csóvára, esetenként a csóva szélére és a teljes elkeveredés szelvényére. Itt gondot okoz, hogy mindkét utóbbi hely elég rosszul definiált: ezért például Turnpenny and Liney (2010) a csóvát konvencióként 100 m átmérőjű körként fogja fel (Illinois államban ez közel 500 m), amelyen belül az EQS-t meghaladó értékek fordulhatnak elő. Najjar et al (1979) szerint (helyesen) a csóva a befolyó víz diffúziója által uralt terület a befogadóban; a vízminőségi határértékeket ezen kívül értelmezik. A csóva kiterjedését korlátozhatják: ezt a legtöbb esetben a keresztzelvény vagy a vízhozam 25 %-a határolja le.

A jelenleg érvényes hazai szabályozás (a 15/2001. sz. „Az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről” című KÖM rendelet 10.§-a) szerint (1) kiemelt létesítmény esetén a felszíni vizek és víztartó képződmények hő szennyezés elleni védelme érdekében a) a kibocsátásra kerülő és a befogadó víz hőmérséklete közötti különbség 11 °C-nál, illetve +4 °C alatti befogadó víz hőmérséklet esetén 14 °C-nál nem lehet nagyobb; b) a kibocsátási ponttól folyásirányban számított 500 m-en lévő szelvény bármely pontján a befogadó víz hőmérséklete nem haladhatja meg a 30 °C-t.

A hazai területen maradvá, egy 1999-ben, a Tisza II tervezett bővítése kapcsán készült nemzetközi áttekintésben Szilágyi (2007) az alábbi korlátokat tartotta elfogadhatónak:  $T_{\max} = 30$  (32) °C és  $\Delta T_{\max} = 7 - 9$  °C (téli ennél magasabb érték is elfogadható). A Vízyűjtő-gazdálkodási Terv<sup>16</sup> (VGT, 2009) javaslata szerint  $T_{\max} = 30$  °C,  $\Delta T_{\max} = 8$  °C általában és 4 °C alatt 12 °C. A csóvára  $\Delta T \leq 3$  °C, míg a visszahűtésre a kisvízi hozam legfeljebb fele hasznosítható (ami nincsen távol a már említett 25 %-tól).

A nemzetközi helyzetképet Turnpenny and Liney (2010) alapján az alábbiakban foglaljuk össze.

#### 5.4.1 USA

Az elég bonyolult EPA irányelvek különböző korú lazac és pisztráng populációkra, továbbá eltérő jellegű folyószakaszokra vonatkoznak. Például a nyári legnagyobb hőmérséklet folyók alsó szakaszán (a maximumok 7 napos átlagával mérve) 20 °C lehet. Hő-csóvákban magasabb értékek is előfordulhatnak, feltéve, hogy a halak nem károsodnak. Itt beavatkozások ajánlottak a megelőzésre:

- a letális hőfokéra (10 s-ig 32 °C felett);
- a hő-sokkéra (26 °C felett a folyó több mint 5 %-ában) és
- a migráció megállításának megelőzésére (21 °C a folyó több mint 25 %-ban).

Ezen túl a vízkivételi műveket a CWA 316 (b) paragrafus szabályozza (lásd korábban).

#### 5.4.2 Hollandia

Az előírások:

- $T_{\max} = 30$  °C a bevezetés helyén,  $\Delta T_{\max} = 7$  °C nyáron, 15 °C télen;
- A csóvában +3 °C növekmény max. 28 °C-ig;

---

<sup>16</sup> Ennek törvényerőre emelését az AB felfüggesztette, maga a VGT pedig nem végrehajtási utasítás jellegű.

- Csóva: max. 25 %-a a keresztmetszvénynek (milyen vízállás mellett?).

#### 5.4.3 EC Freshwater Fish Directive (FFD, 78/659/EEC)

Meleg-vízű befogadókra a kötelező határértékek (nem ajánlások) az alábbiak:

- legfeljebb + 3 °C a csóva szélén (?);
- ugyanitt  $T_{max} = 28$  °C az idő 98 %-ában.

#### 5.4.4 Európa

A vizsgált európai országok többségére az alapot az FFD jelenti. Ennek megfelelően meleg-vízű folyókra:

- $T_{max} = 28$  °C;
- 3 °C (5 °C) a megengedett változásra.

#### 5.4.5 Javasolt VKI hőmérsékleti határértékek az Egyesült Királyságban

Az Egyesült Királyságban munkacsoportot hoztak létre az EU VKI-nak megfelelő környezeti határérték javaslat kidolgozására, ami az UK egészére alkalmazható (Turnpenny and Liney, 2010). Ennek kiindulópontja a korlátok nemzetközi áttekintése, az EU VKI, az FFD, szerteágazó adatok elemzése és a meglévő határértékek megfelelésének ellenőrzése. Az ily módon - számos ország szakembereinek értékelését is figyelembe vevő - VKI osztályozást követő javaslatot az 5.3 táblázat tartalmazza.

Tipológia	Kiváló/jó	Jó/közepes	Közepes/ Gyenge	Gyenge/rossz
<b>Normatív határérték, °C</b>				
Hideg víz	20	23	28	30
Meleg víz	25	28	30	32
<b>Max. változás (térben, időben), °C</b>	3	3	3	3

5.3 táblázat: Javasolt VKI hőmérsékleti határértékek (UK, Turnpenny and Liney, 2010)

A hőmérsékleti osztály-határok összhangban vannak az eddig elmondottakkal és a tendenciákkal. Például a 28 - 30 °C felső korlát viszonylag széles tartományt fed le a gyengétől a jóig (meleg víz). Az osztály határokat a csóvára tett korlát egészíti ki: hígulásra a meder vagy a vízhozam legfeljebb 25 % hasznosítható az idő 95 %-ban.

A kérdéskörrel kapcsolatban a szakirodalomban számos vitatott kérdés található: szigorú vagy sem a korlát? Betartják? Hogyan értelmezzük a csóva szélét és a megengedett hígító víz hozamát? Mennyi lehet a határérték meghaladási ideje és mértéke? Egyedi, a helyi viszonyokat figyelembe vevő határérték a célszerű vagy sem? Érdemes-e elkeveredési modellszámításokra építeni a határértékek meghatározását vagy nem? És a felsorolás távolról sem teljes.

## 5.5 A jövő lehetséges előírásai

A jövőről nehéz beszélni, hiszen nem rajtunk múlik. A paksi bővítés szempontjából a következő 10 - 15 év változásai lesznek mértékadók. A felsorolt példák és a bemutatott trendek alapján az alábbi fontos következtetéseket vonhatjuk le, amelyek majd a 9. fejezetben játszanak fontos szerepet:

- A hőmérsékleti korlátok - nagy bizonyossággal - nem válnak megengedőbbeké;
- Az UK példához hasonlóan valószínű az igazodás az EU VKI jó állapot osztályozásához, ami itthon még kimunkálásra vár;
- A Duna hígításra felhasználható legnagyobb vízhozamát (vagy keresztmetszelvény hányadát) a szabályozás által minden bizonnyal megkötik;
- A felső korlát  $T_{\max} = 28 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$  lehet, a hőlépcsőre pedig nyáron  $\Delta T_{\max} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$  (télien magasabb);
- A csóvára vonatkozó előírás függvénye a  $T_{\max}$  meghatározásának (értéke és helye?);
- A legfontosabb és meghatározó  $T_{\max}$  helyének előírása nehezen kiszámítható. Ez vonatkozhat a kilépő szelvényre, a befogadóra, a csóvára, a + 500 m szelvényre stb. Az EU VKI által képviselt tendencia mindenestre határozott elmozdulást jelent a befogadó határértékek irányába.

## 6. AZ ELKEVEREDÉS, ÉS A BEVEZETÉSI VÁLTOZATOK VIZSGÁLATA

### 6.1 Bevezetés

A paksi bővítés frissvízhűtéses változatának értékeléséhez és a jelenlegi hőmérsékleti korlát betartásához a + 500 m-es szelvény térségében elengedhetetlen ismernünk a befogadó Duna hidrológiai, hidraulikai és elkeveredési viszonyait. Ennek érdekében 2011-et megelőzően a BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszéke több éven keresztül végzett mérési-modellezési munkákat. „A Paksi Atomerőmű hőterheléséhez kapcsolódó Üzemviteli rendszer továbbfejlesztése és az elkeveredés javításának vizsgálata 2010” című tanulmányban két- és háromdimenziós hidrodinamikai- és hőtranszport-modelleket dolgoztunk ki, mellyel lehetőség nyílt a határérték szelvénybeli hőmérséklet-eloszlásának leírására. Jelen tanulmányban a háromdimenziós modellel számoltunk, mely a lokális áramlási jelenségek (örvények és holtterek) hatását is figyelembe veszi (BME VKKT, 2010)

### 6.2 Módszertan

A modellrendszer két fő részegységet tartalmaz, amelyek a hidrodinamikai és a hőtranszport-számításokat végzik. Mindegyikből két változat készült el: (i) egy 3D rendszer modell és (ii) egy, a függély menti integrálátlagokat tartalmazó 2D megoldás. A sebességtér ismerete szükséges a hőviszonyok alakulásának leírásához, ezért a hidrodinamikai számítás jelenti az első lépést. Ehhez ismerni kell a medermorfológiát és peremfeltételként a sebességeket a belépő szelvényben, és az alsó perem vízszintjét. Ezek mérésből származtathatók, amelyeket a VITUKI végzett el.

A hidrodinamikai modell az anyag- és az impulzus megmaradásán (kontinuitási- illetve Navier-Stokes egyenlet), valamint a turbulens sebesség-ingadozások közelítésén alapul (6.1 ábra). Ez utóbbit a 3D változat izotróp turbulencia modell segítségével számolja (a 2D módszer esetében ezt az örvény-viszkózitási tényező bevezetése helyettesíti), mely külön transzportegyenletet old meg a turbulens kinetikus energiára és ennek az energiának a disszipálódására. A sebességtér ismeretében a hőtartalom, illetve a víz hőmérséklet alakulása a skalár hőtranszportegyenlet megoldásával számítható.



#### 6.1 ábra; Az alkalmazott hidrodinamikai- és hőtranszport-modell

A megoldáshoz az áramlási teret több mint félmillió kisebb egységre kell osztani (véges térfogatok módszere) és a peremértékekből kiindulva numerikus, fokozatos közelítéssel meghatározni a hőmérséklet eloszlását. A kellően finom tér- és időbeli felbontás nagy számítási igényt jelent és korlátozza a kipróbálható változatok számát. Ilyen szempontból a 2D modell használata lényegesen gyorsabb. További egyszerűsítés érhető el analitikus, közelítő, Gauss-féle megoldással (Somlyódy, 1985), amelyet a numerikus modellre illesztünk, majd a változatok számítására használunk. Az illesztést megkönnyíti, hogy a hőmérsékletnövekedés a hő-árammal lineárisan változik (ha csak azt a sebességtér módosulásai meg nem zavarják meg; lásd később). Ebből adódóan a hőmérsékletcsökkenés – inter- vagy extrapolálással – közelítően meghatározható olyan értékekre is, melyhez nem végeztünk modellszámításokat.

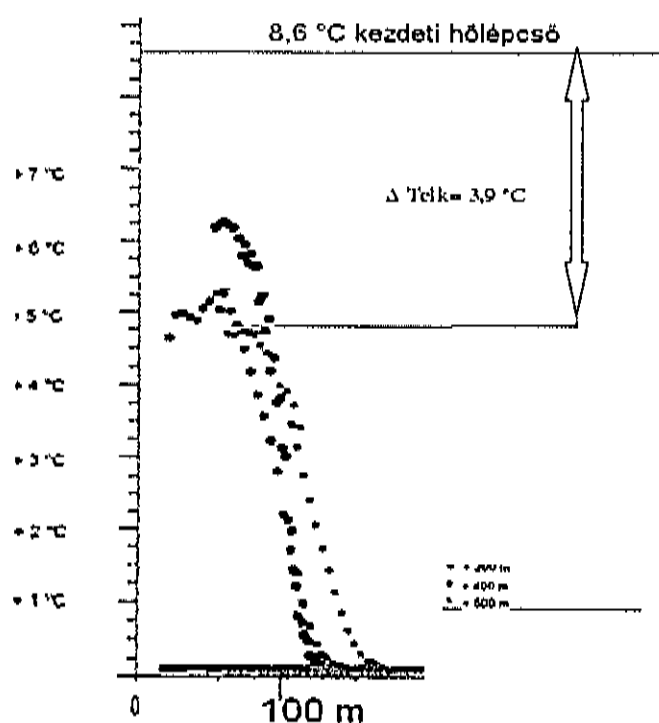
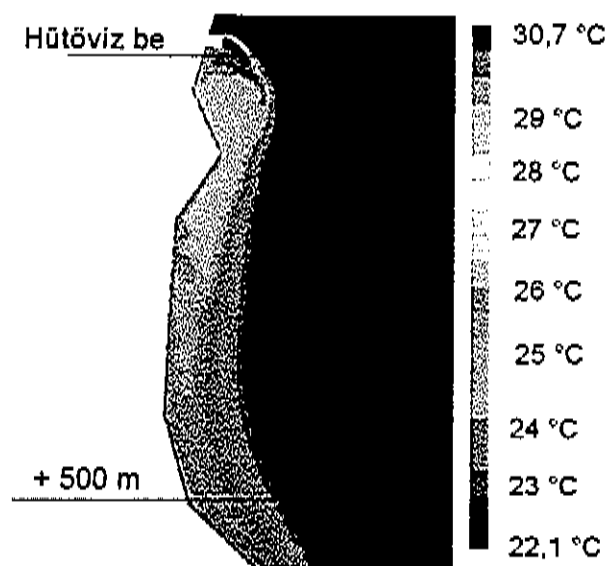
A modellek kalibrálása és igazolása a BME VKKT (2007) és (2010) tanulmányokban található. A tervezett paksi bővítéssel kapcsolatban a következő kérdésekre kerestük a választ:

- különböző hőlépcsők alkalmazásával mekkora a lehülés a +500 m-es határértékszelvényig?
- melyek lehetnek az elkeveredés szempontjából kritikus helyzetek (vízhozam és hőmérséklet)?
- a bekeverés intenzifikálásával hogyan javítható a hőmérsékletcsökkenés a folyóban, a +500 m-es szelvényig?
- hogyan alakulnak a költségek?

### 6.3 A felmelegedett hűtővíz elkeveredése

A paksi hűtővíz Dunába engedése után annak a vízzel keveredik, hígul és ezáltal a csóvában veszít a hőtartalmából. A hőmérsékletcsökkenés elsősorban a Duna áramlási viszonyaitól és a beengedett hűtővíz mennyiségétől, hőfokától függ. A jobb parti bevezetés után kialakuló csóva mindvégig a part mentén marad. Itt a sekély meder miatti pangó zónák a keveredést gátolják. Példaként tekintünk egy olyan esetre, amikor a Duna vízhozama  $1350 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

hőmérséklete 22,1 °C és a meleg víz hozama 100 m<sup>3</sup>/s, hőmérséklete 30,7 °C. Ez egy jelenlegi állapotnak megfelelő helyzetet:  $\Delta T = 8,6$  °C. A 6.2 ábrán látható, hogy a beengedés környezetében az elkeveredés gyors a megnövekedett turbulencia és hőmérséklet-gradiens miatt, majd a csökkenés lelassul. A hőmérséklet eloszlása (melyet a mélység szerinti integrálátlagból nyertünk) a csövában közelítően követi a normális eloszlást (fél-Gauss görbe), ugyan a maximum a partéltől némileg távolabb jelentkezik.

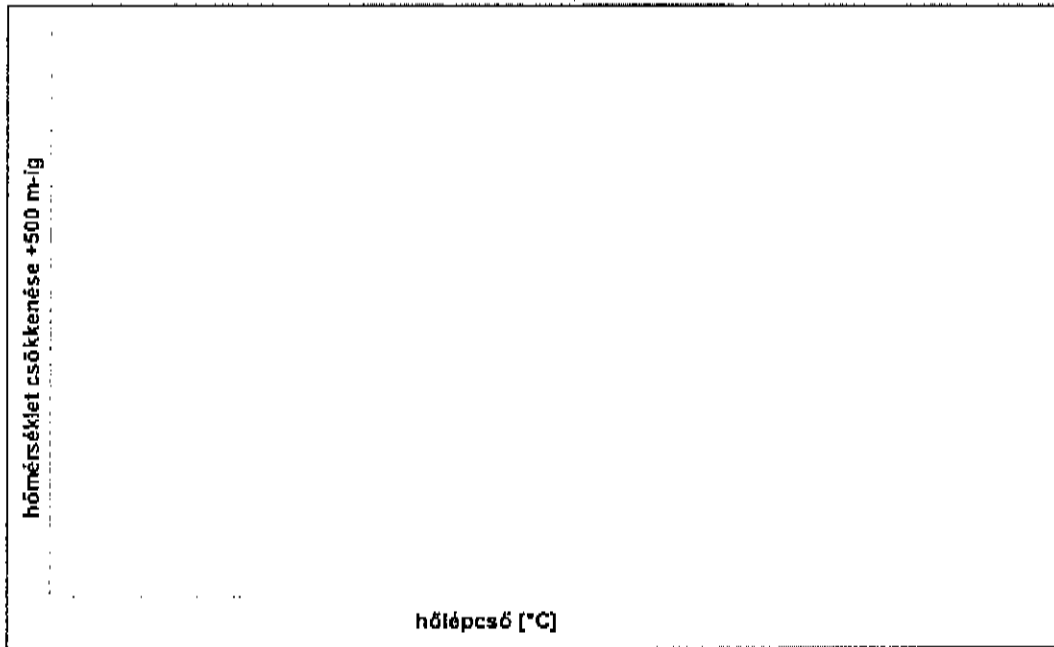


6.2. ábra: A meleg víz elkeveredése; hőmérséklet-viszonyok és eloszlások a beengedés utáni szelvényekben és az elért hőfok csökkenés ( $Q \approx 1350$  m<sup>3</sup>/s)

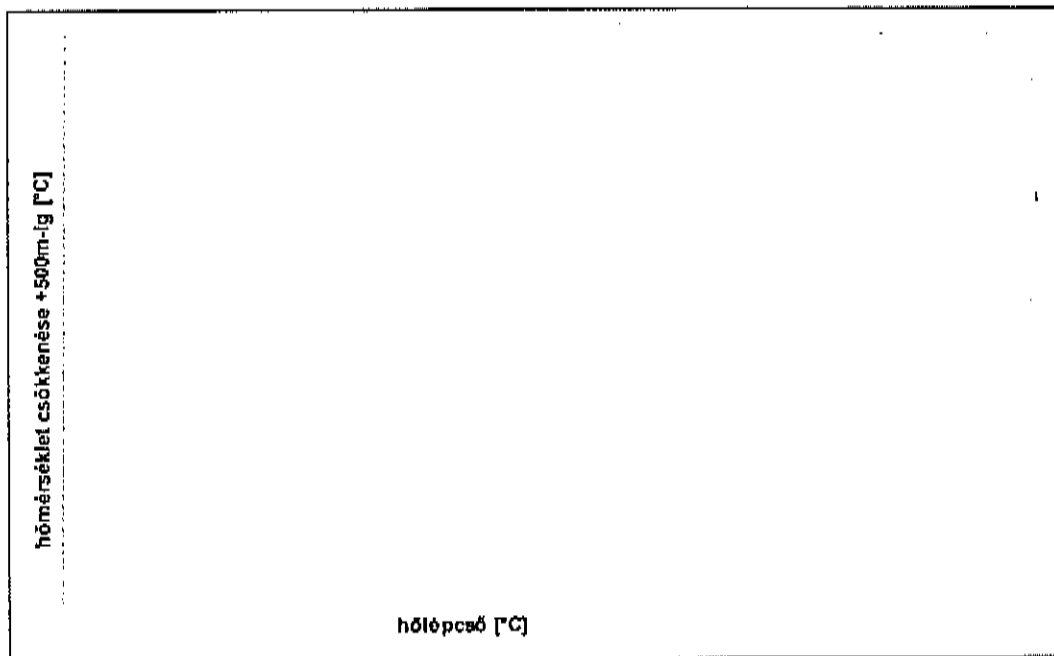
A kezdeti 8.6 °C-os hőlépcső az alvízen 200 m távolságban 6.4 °C-os, 400 m-nél 5.3 °C-os, majd a határértékszélvénnyben 4.7 °C-os maximális többlethőmérsékletet eredményezhet. Másképpen, a hőmérsékletcsökkenés ( $\Delta T_{\text{cik}}$ ) rendre: 2.2 °C, 3.3 °C, és 3.9 °C.

Az előző esetet kibővítve, a modellszámításokat elvégeztük különböző vízhozamokra (kis- és középvíz, 1100 m<sup>3</sup>/s - 2500 m<sup>3</sup>/s) a 3D-s numerikus modellel és különböző hőlépcsők esetére (3 - 10 °C). Az eredményeket (hőmérséklet csökkenés,  $\Delta T_{\text{cik}}$ ), a jelenlegi bevezetést feltételezve a 6.3 (a) - (b) ábrák szemléltetik. A hűtővíz bevezetés 100 m<sup>3</sup>/s és 200 m<sup>3</sup>/s volt, ami körülbelül lefedi a jövő lehetséges tartományát 2\*1200 MW-os teljesítmény, 8 és 11 °C hőlépcső esetén (akár a régi és új blokkok együltműködése mellett is). Az ábrákból az alábbi megállapítások tehetők:

- 200 m<sup>3</sup>/s meleg víz bevezetés esetén kétszer több hőmennyiségnek kell elkeverednie, ezért a hőfokcsökkenés kisebb, mint az előző esetben;
- A linearitás nem mindig teljesül, aminek magyarázata a sebességtér módosulásai;
- Szintén ezzel összefüggésben a - Duna teljes vízhozamával számított - hígulás hatása nem egyenletes: különösen a nagyobb melegvízhozam esetében feltűnő, hogy a hígulás hatása némileg meglepően a 1100, 1400, 2600 és 1800 m<sup>3</sup>/s sorrendnek megfelelően alakul;
- Ennek oka a sebességtér part menti változása. A vízhozam növekedésével a sodorvonal a bal part irányába húzódik (1800 m<sup>3</sup>/s felett), így a mintegy 120 m széles csóvát hígító vízhozam csökken, majd 2500 m<sup>3</sup>/s körül visszaáll az elvárt kép. A részleteket a 6.4 ábra mutatja;
- A példa arra hívja fel a figyelmet, hogy a hígulás (lokális) hatása nem mindig a legkisebb vízhozamnál jelentkezik;
- Ugyanakkor a 2500 m<sup>3</sup>/s-os Duna hozamhoz tartozó megnövekedett csóva-hozam nem jelenti az elkeveredés számottevő javulását. Ennek oka abban keresendő, hogy a mikro és makro turbulens hatások is fontosak lehetnek az elkeveredés szempontjából, amit a 3D modellel számolunk.
- Látható, hogy 8 - 11 °C-os hőlépcsőnél - a Duna hozamától függetlenül - legalább 2 - 3 °C körüli hőmérsékletcsökkenés érhető el.



6.3 (a) ábra: A hőlépcső függvényében a természetes hőmérsékletcsökkenés a + 500 m szelvényig, különböző Duna vízhozamoknál, 100 m<sup>3</sup>/s-os melegvíz-bevezetés mellett, a 3D numerikus modellel számolva

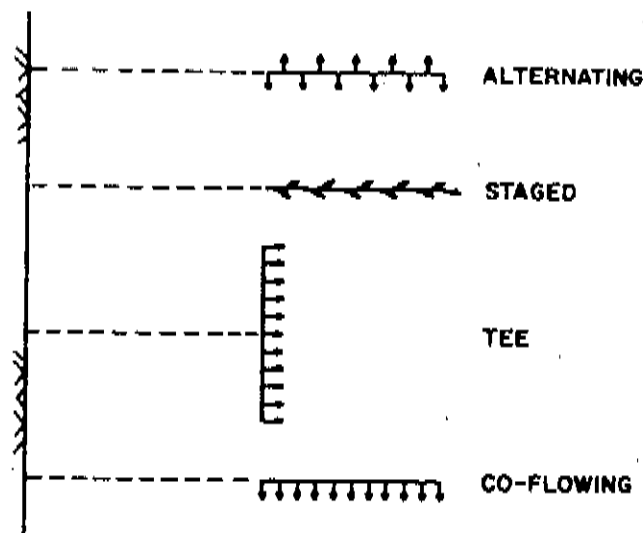


6.3 (b) ábra: A hőlépcső függvényében a természetes hőmérsékletcsökkenés a + 500 m szelvényig, különböző Duna vízhozamoknál, 200 m<sup>3</sup>/s-os melegvíz-bevezetés mellett, a 3D numerikus modellel számolva

6.4 ábra: 120 m széles melegvízesővízhozama a dunai háttérhozam függvényében

#### 6.4 Intenzív bekeverés

A nemzetközi gyakorlat és korábbi munkáink alapján a leghatékonyabb megoldást [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]



6.5 ábra: Multi-port diffúzorok fúvóka elrendezései sekély vizekben (Adams, 1982)

Első közelítésben a Gauss-modell segítségével vizsgálhatjuk az egyszerű többpontos bevezetés eredményességét (lásd korábban a 6.2 pontot). A Dunához képest a hőmérsékletkülbség maximális értéke a következő módon számolható ki:

$$\Delta T_{\max-500m} = \frac{q \cdot \Delta T_{\text{hőforrás}}}{2H \sqrt{\pi D_y v_x x}}$$

ahol  $q$  a bevezetett meleg víz hozama,  $H$  az átlagos mélység,  $D_y$ =keresztirányú diszperziós tényező,  $v_x$  a csóva átlagsebessége,  $x$  pedig az 500 m-es távolság. Feltételezzük, hogy az áramlás permanens és a mélység menti változások elhanyagolhatóak. Ha a csóva eléri a partot, akkor onnan a részecskék „visszaverődnek”, ezért a peremfeltételt kielégítendő, a tükrözési elvet alkalmazzuk. Így a koncentráció keresztirányú eloszlása:

$$\Delta T(500m, y) = \frac{q \cdot \Delta T_{\text{hőforrás}}}{2H \sqrt{\pi D_y v_x x}} \left( \exp\left(-\frac{v_x (y - y_0)^2}{4D_y x}\right) + \exp\left(-\frac{v_x (y + y_0)^2}{4D_y x}\right) \right), \text{ ahol}$$

$y_0$  a bevezetés helye a parttól mérve.

[REDACTED]

Egy példát - nem megoldási javaslatot - a 3D és az analitikus modell összehasonlítására a 6.6 ábra szemléltet.

[REDACTED]

6.6 ábra: Hőmérsékleteloszlás (3 diffúzor, 11 °C, 96 m<sup>3</sup>/s melegvízhozam): a 3D numerikus és az analitikus modell összevetése

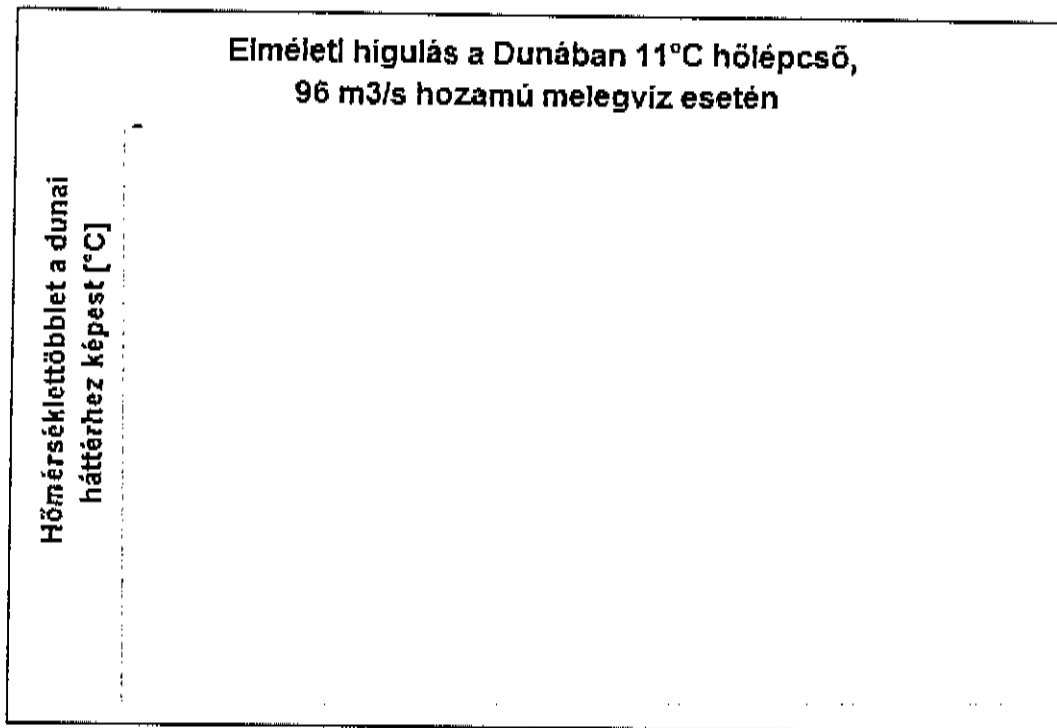
Így, az analitikus eljárás kellően jó közelítést ad a határértékszervény a hőmérséklet növekmény becslésre, ezért a következőkben ezt fogjuk használni.

Az elkeveredési számításokat elvégeztük a tervezett jövőbeni paksi alternatívákra. A többpontos bevezetés tervezésénél az új blokkokra koncentráltunk, de számoltunk az átmeneti időszakokra is, amikor –a tervek szerint - a régi és új blokkok együtt működnek. A különböző melegvízhozamoknál és hőlépcsőknél jelentkező hőmérsékletkülbséget a 6.1 táblázat foglalja össze. Itt a megengedhető háttérhőmérsékletnél mintegy 1°C biztonsági tartalék hagyandó (lásd a táblázat utolsó sorát).

Blokk teljesítmény	2 x 1200 MW				2 x 1600 MW			
	11 °C		8 °C		11 °C		8 °C	
Hőlépcső: Meleg víz [m <sup>3</sup> /s]	96	196	132	232	126	226	172	272
1 db diffúzor	■	■	■	■	■	■	■	■
3 db diffúzor	■	■	■	■	■	■	■	■
10 db diffúzor	■	■	■	■	■	■	■	■
T <sub>b,max</sub> (3 diffúzorra)	■	■	■	■	■	■	■	■

6.1 táblázat: többlethőmérséklet, adott teljesítmény, hőlépcső és melegvízhozamok mellett (analitikus modell)

A késsel jelölt számítás részleteit a 6.7 ábra mutatja.



6.7 ábra: 2 x 1200 MW blokkjelcsítmény, 11 °C hőlépcső és 96 m<sup>3</sup>/s melegvízhozam esetén a határértékszervény többlethőmérséklet eloszlása a Gauss-moddell.

[REDACTED]

A 6.1 táblázat utolsó sorában feltüntettük a megengedhető legnagyobb háttérhőmérsékleteket.

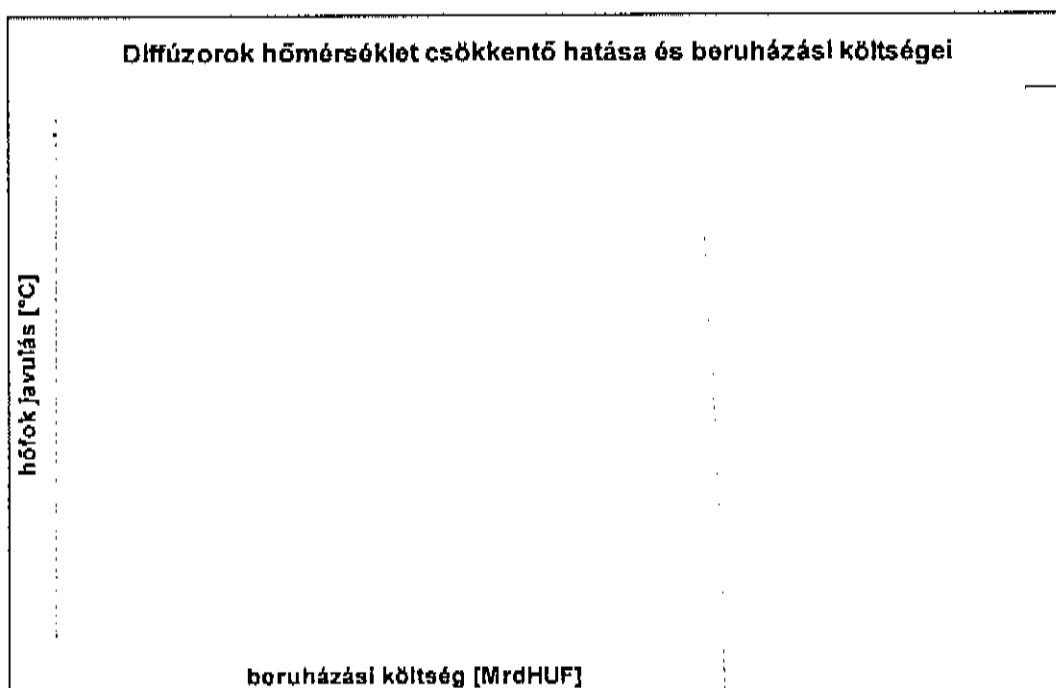
[REDACTED]

A leírt módon tervezhetők a diffúzorok száma és kiosztása. Parti bevezetésen túl 2 (a részletes tervezéstől függően esetleg több) tűnik célszerűnek (a vízhozam korlátától függően is). Mindegyik diffúzorhoz külön cső tartozik. A beruházási költség - sajtolásos technológiát feltételezve - az indító és fogadó aknán kívül) a csőhosszaktól függ (7. fejezet). A bevezetések egymástól való távolsága a hőfok csökkenését is alapvetően határozza meg. Ezért célszerű a beruházási költség függvényében vizsgálni az elérhető hőmérsékletjavulását.

Ehhez változtattuk a hőlépcsőt, a melegvíz-hozamot, a diffúzorok számát [REDACTED] és egymáshoz viszonyított távolságát [REDACTED]. A költségek becslése a 7. fejezetben található.

A 6.8 ábrán látható, hogy minél távolabb tesszük a bevezetési pontokat, annál jobb elkeveredéssel számolhatunk. Ugyanakkor, elsősorban az aknák számával és másodsorban a felhasznált csőmennyiséggel a beruházási költség is nő. Ennek ellenére, viszonylag kis költségnövekedéssel jelentősen fokozott elkeveredés mutatható ki (ez szélső esetben 9 °C körüli hőmérséklet csökkenést eredményez,  $\Delta T = 11$  °C).





6.8 ábra: Diffúzorok beruházási költsége és a hőmérsékleteszkkenés + 500 m, 1100 m<sup>3</sup>/s, különböző hőlépcső és bevezetett hűtővíz hozam mellett)

Megjegyzés: a lila négyzetekből és kék háromszögekéből álló pontsorok a diffúzorok különböző távolsága miatt jelennek meg (lásd korábban). Minél hosszabb a vezeték, annál drágább a beruházás, de jobb az elkeveredés is. A kék négyzet a VKKT javasolt megoldását jelenti (7. fejezet).

Kérdés, hogy a levezetett értékek - biztonsági tartalék figyelembe vételével is - mire elegendők az éghajlatváltozás tükrében? A 4. fejezet szerint a 26, 24 és 22 °C maximum hőmérsékletek átlagos évi tartóssága 0,4, 1,0 illetve 10 nap. A 24 és 22 °C tartóssága - a vizsgált legnagyobb mértékű felmelegedés esetén - számottevően, mintegy 20 illetve 68 napra nő. Ezek - és a 26 °C hőmérséklet is - kezelhetők. A kérdés azonban az, lesz-e ennél magasabb hőmérséklet? Ha igen, milyen tartóssággal? Választ az analógia elvén alapuló, vagy más módszer sajnos nem tud adni. Így az alternatív – költői – kérdés: 2 x 1200 MW mellett elégséges tartalékot nyújtanak-e a 6.1 táblázat megoldásai?

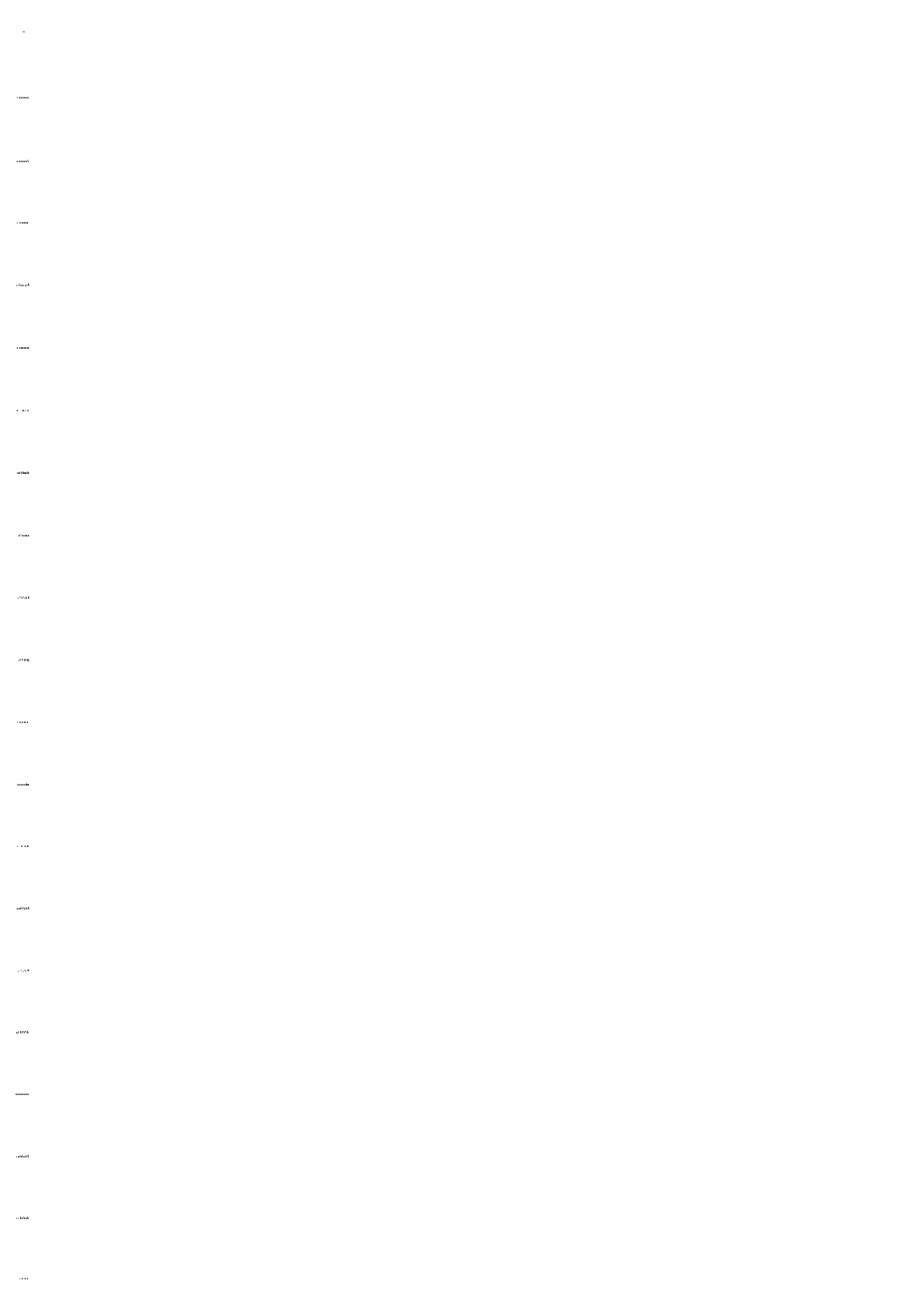
## 6.5 Összefoglalás

A paksi hűtővíz elkeveredésének vizsgálatához 3 D-s hidrodinamikai- és hőtranszport-modellt alkalmaztunk a Dunára, amellyel a +500 m-es szelvény hőmérsékletviszonyai értékelhetők voltak. A numerikus modellre közelítő analitikus modellt illesztettünk, így nagyszámú változat költség-hatékonyságának értékelése vált lehetségessé.

Megállapítottuk, hogy a különböző hőlépcsőknél mekkora hőmérséklet-eszkkenéssel lehet számolni a határértékszelvényig. A jelenlegi kiépítettség és parti bevezetés mellett elegendő a természetes elkeveredés hatása. A jövőben, a bővítés hatására a meleg víz mennyisége akár a

200 m<sup>3</sup>/s értéket is meghaladhatja (amennyiben a meglévő blokkok is működésben maradnak) és a klímaváltozás miatt növekedhet a Duna vízhőmérséklete. Ezek együttesen szükségessé teszik intenzív és költség-hatékony bekeverési módokat kialakítását.

[REDACTED]



## 7. A HŰTŐRENDSZEREK BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGEINEK ELLENŐRZÉSE

### 7.1 Bevezetés

A jelen fejezet célja a Tanulmány frissvízhűtésű rendszerekre (FVR) és természetes huzatú nedves hűtőtornyokra (THNH) levezetett beruházási költségbecsléseinek ellenőrzése és összehasonlítása. Az elemzést több lépésben hajtjuk végre. Így felhasználunk néhány, a nemzetközi irodalomban rendelkezésre álló tanulmányt. Vizsgálódásainkat első lépésként az MIT hetvenes évek végén végzett kutatásaiból levonható következtetésekkel kezdjük. Ezek abból a szempontból - még három évtizedet követően is - unikálisak, hogy - szemben a többi forrással - lehetővé teszik a két változat, FVR és THNH összehasonlítását és egymáshoz viszonyított értékelését. Ezt követően az EPA módszere alapján becsüljük a THNH változat költségeit (FVR-re ilyen nem áll rendelkezésre). Harmadik lépésben áttekintjük az elmúlt évtized néhány megvalósult THNH projektjének építési adatait. Végezetül a Tanulmány részletei alapján vizsgáljuk a becslések reprodukálhatóságát, majd magunk is készítünk beható, a fajlagos költségeken alapuló, tételes mérnöki számításokat.

### 7.2 Az MIT kutatások hasznosítása az FVR és THNH változatok összehasonlítására: első lépés

Az 1. fejezetben már hivatkozott MIT kutatás keretei között Najjar és munkatársai különböző hűtési módok (frissvízhűtés, hűtőtó, nedves és száraz hűtőtornyok) beruházási költségeit is elemezte (Najjar et al, 1979), 1200 MW névleges kapacitású GE turbinára. Ez módot ad a paksi projektre a nagyságrendek és az arányok vizsgálatára, a két változat-csoport összehasonlítására.

- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]

<sup>17</sup> 1 láb = 0.316 m

<sup>18</sup> MIT jellemző, elvi példára vonatkozik.

<sup>19</sup> Itt a diffúzor és a diffúzor sor a bevezetés módjára illetve annak több pontos voltára utal. A multi-port diffúzor egymás melletti fúvóka sort jelöl, sekély vizek és nagy hozamok esetében annak érdekében, hogy a bevezetés impulzus hatását kihasználva a függőleges-, majd adott szakaszon a keresztirányú elkeveredés minél gyorsabban következzen be (Adams, 1982). A multi-port diffúzorokat gyakran alkalmazzák felmelegedett hűtővizek befogadóba történő bevezetésére. Ennek előfeltétele a gondos hidraulikai tervezés (például Jirka, 1982). A térbeli gyors elkeveredés elérhető több diffúzorral és/vagy multi-port diffúzorral.

• [REDACTED]

A főbb beruházási költség összetevők és arányok ellenőrzése céljából a 7.1 táblázatban feltüntettük az MIT és a Tanulmány szerinti becsléseket (Najjar et al, 1979 és Tanulmány 1. kötet 10.4-1 melléklet). A változatok a következők:

- MIT FVR - frissvízhűtés parti bevezetéssel (ez a jelenlegi paksi elrendezésnek felel meg);
- MIT FVR/1500 - frissvízhűtés 1500 láb hosszú diffúzor sorsal;
- MIT THNH - természetes huzatú nedves hűtőtorony;
- MIT FVR/500 - a tervezett paksi bővítésnek megfelelő, parti + két bevezetési ponttal rendelkező FVR (ahol a távolabbi pont a parttól kb. 500 lábra van);
- EGI FVR – a Tanulmány szerinti paksi változat, utóhűtő nélkül, a VITUKI által ajánlott bevezetéssel – parti + 2 ponton történő bevezetés (2 x 1200 MW,  $\Delta t = 11^\circ\text{C}$ , a Tanulmány 1. kötet 4.4.3-1. melléklet 3/6. oldal 6. oszlop alapján).

A táblázat tartalmazza az abszolút értékeket és az egyes költség komponensek százalékos megoszlását, továbbá a főbb változatok MIT FVR/500-hoz viszonyított arányait.

Változatok Költségek	MITFVR		MIT THNH	MITFVR 500		EGI FVR		EGI THNH	
	1500	500							
Építészeti									
Gépészeti									
Kondenzátor									
Bevezetés									
Egyéb									
Összesen									
Arányok (%)									

7.1. táblázat: Az MIT és a Tanulmány szerinti becslések összehasonlítása (millió \$ és milliárd Ft)

[REDACTED]

<sup>20</sup> Measuring Worth az interneten, feltevéstől függően [REDACTED] között ajánl átszámítási értékeket, az átlag [REDACTED] körüli.

<sup>21</sup> Ez az átváltás jól teljesül kondenzátorra, az MIT (1976) és a Tanulmány becslését összevetve.

<sup>22</sup> Vegyes költségek: vízelőkészítő, pótvíz és segédhűtő rendszerek.

- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]

### 7.3 A tornyos hűtés költségei az EPA ajánlása szerint: második lépés

A következő lépésben kézenfekvő a THNH változat költségeinek ellenőrzése. Erre a célra az EPA (2000, 2001) jelentéseit használjuk fel, ami különböző elvű és anyagú hűtőtornyok költségfüggvényeinek meghatározásával foglalkozik, alapvetően szakemberek tapasztalati megfontolásaira építve. [REDACTED]

[REDACTED] Az EPA vállalkozás aktualitását a folyamatban lévő, szigorított környezeti szabályozás – §316(b) New Facility Rule (EPA, 2000) – indokolja (lásd 5. fejezet), ami alapvetően a kisebb környezeti változásokat eredményező hűtőtornyos megoldásokat helyezi előtérbe.

[REDACTED]

### 7.4 Az elmúlt évtized néhány hűtőtornyanak építési költsége: harmadik lépés

[REDACTED] Összehasonlításként három, 1999 és 2009 között Németországban megépült, a jelenlegihez hasonló nagyságú torony költségei [REDACTED] állnak rendelkezésre (a magasság rendre 160, 172 és 200 m), amely adatok a Megbízónktól származnak. A költség az MIT (1979) szerint a magasság függvényében lineárisan változik. [REDACTED]

<sup>23</sup> 1 gallon = 4.54 l.

## 7.5 Részletes költségszámítások: negyedik lépés

### 7.5.1 A vizsgált változatok

Mindkét változat (THNH és FVR) esetében a beépített teljesítmény  $P_{nevl} = 2 \times 1200$  MW. Tekintettel arra, hogy kondenzátorra (és a tornyos/utóhűtős változatoknál segédhűtő-rendszerre) minden esetben szükség van, annak költségeit nem vizsgáljuk és a teljesség érdekében elfogadjuk a Tanulmány becslését.

#### (A) Hűtőtornyos változat

Az előző pontokban elmondottak alapján elfogadjuk a Tanulmány [REDACTED] tartott  $2 \times 1$  db természetes huzatú nedves rendszerű hűtőtornyra tett javaslatot ([REDACTED] I. kötet 125. oldal<sup>24</sup>) és annak a költségbecslését (lásd később).

#### (B) Frissvízhűtésű változat

Feltételeztük, hogy

- kétlépcsős dunai vízkivétel valósul meg,
- a hidegvízcsatorna új - függő medrű - csatorna,
- a kondenzátori hőlépcső  $\Delta t = 11$  °C, miután a Tanulmányban erre az esetre dolgozták ki részletesebben a terveket,
- a meglévő melegvízcsatorna kerül felhasználásra és utóhűtés nincsen.

A visszavezetett melegvízre vonatkozó korlátozás a PAE Zrt.-nek az I. kötet 2.3.1-1. mellékletében megfogalmazott igényének megfelelően a jelenleg érvényes 15/2001. sz. KÖM rendelet szerinti, azaz jelenleg a visszavezetés szelvényében a

$$30^{\circ}\text{C} + \Delta T_{\text{elk}} \geq T_h + \Delta T$$

korlát létezik (2. fejezet). Itt  $T_h$  az éghajlatváltozástól függő háttér hőmérséklet (4. fejezet).  $\Delta T_{\text{elk}}$  a folyóban az elkeveredés hatására bekövetkező „lehűlés”, ami a 6. fejezet szerint függvénye a Duna vízhozamának, a hűtővíz mennyiségének, a hőlépcsőnek, a turbulencia viszonyoknak és a bevezetés módjának,

$$\Delta T_{\text{elk}} = f(Q, q, \Delta T, D_y, \text{a bevezetések módja és száma}).$$

Értéke a részletes vizsgálatok szerint  $2 - 6$  C° (6. fejezet). A melegvíz visszavezetés lehet (i) parti (mint a jelenlegi állapotban) és (ii) kombinált parti + és egy vagy több pontos folyóbeli bevezetés az elkeveredés javítása érdekében. [REDACTED]

### 7.5.2 Beruházási költségek

A Tanulmány részletes számításokat tartalmazott mind a beruházási költségeket (BK), mind az életciklus-költségeket (ÉcK) illetően. [REDACTED]

[REDACTED] Ezt ismerte fel az EGI-vezette konzorcium

<sup>24</sup> Az oldalszám hivatkozások a 2011. május 4-i keltű tanulmányra vonatkoznak.

megbízójaként az MVM Zrt. is, és felkérte Tanulmány készítőit, hogy a tornyos hűtés beruházási költségeit, mennyiségekre és egységárrakra lebontva, az általa megadott (a Mélyépterv által készített) tételista szerint dolgozza ki (lásd a 7.1 mellékletet).

Megjegyezzük, hogy az elkészült táblázat még mindig nem felel meg teljesen egy tételes mennyiségi kiírással illetve költségvetéssel szemben támasztható követelményeknek, tekintettel azonban arra, hogy a BK ennél részletesebb felbontása nem állt rendelkezésünkre, a nagyságrendek és az arányok ellenőrzése céljából ebből indultunk ki.

[REDACTED] Márpedig a 7.1 melléklet vezetett a Tanulmány utolsó, ma is érvényes hecsléséhez, amit több oldalról ellenőrizve magunk is helyesnek tartunk (lásd korábban).

#### **(A) Tornyos hűtés**

##### ***Építési munkák***

[REDACTED]

Az acél hűtővíz fővezeték építése tekintetében a 7.1. melléklet ellentmondásos, hiszen a 10. tétel a leírás szerint „Acél hűtővíz fővezeték térszín feletti vezetéssel...”, a megjegyzés szerint pedig „... DN2800-as szénacél csővezeték közös árokban föld alatt vezetve, homokágyra fektetve, cső feletti föld visszatöltve és tömörítve, maradékföld elszállítva”. Az ellentmondást nem állt módunkban feloldani; az egységárakat – átmérőarányosan – a frissvízes hűtésnél alapul vettük. [REDACTED]

##### ***Gépészeti munkák***

A speciális hűtőtornyos gépészeti berendezések (hűtőbetét, cseppleválasztó, vízszóró fejek stb.) árát nem állt módunkban megvizsgálni: ezek gyártói/beszállítói ajánlat alapján adhatók meg. A gépészeti költségek legjelentősebb tétele (közel egyharmada) a kondenzátor költsége.

[REDACTED]

[REDACTED] Ezen arányszámok lesznek segítségünkre a frissvízhűtéses változat gépészeti és egyéb költségeinek becslésénél.

---

<sup>25</sup> Összes költség / összes beton mennyiség.



## (B) Frissvizes hűtés

### Építési munkák

[REDACTED]

### Gépészeti munkák

Megkíséreltük a gépészeti munkák költségeit is becsülni a Tornyos hűtés melléklet szerinti árszámításából vett egységárakkal. Noha a gépészet esetében az ilyesfajta egységár-alapú számítás jóval több bizonytalanságot rejt, a kapott eredmények – fenntartásokkal kezelve – támpontul szolgálhatnak. [REDACTED]

### VITUKI víz visszavezetés

[REDACTED]

### VKKT vízbevezetések

A Tanulmány 2. kötet mellékletében szerepelnek a VITUKI vízbevezetés rajzai. Nehezen indokolható megoldás, hogy a mederbe ferdén (a partvonalra és a sodorvonalra ne közel merőlegesen) történjen a sajtolás. Hasonló mértékű elkeveredés kisebb költségű beruházással is elérhető, különböző számú bevezetéssel. [REDACTED]

[REDACTED]

A frissvizes hűtés beruházási költségeinek becslésére végrehajtott számításokat részletesen ismerteti a 7.2 függelék.

### 7.5.3 Összehasonlító értékelés

A 7.2 táblázat összesíti az eddigi eredményeket, az MIT, a Tanulmány szerinti és a jelen VKKT becsléseket a két változatra. [REDACTED]

Változatok	MIT THNH	MIT FVR 500	EGI FVR	VKKT FVR	EGI THNH
Költségek	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
Építészeti	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
Gépészeti	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
Kondenzátor	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Változatok	MIT TIINH	MIT FVR 500	EGI FVR	VKKT FVR	EGI TIINH
Költségek					
Bevezetés					
Egyéb <sup>26</sup>					
Összesen					
Összesen, jelenértékben <sup>27</sup>					
Arányok (%)					

7.2 táblázat: Az MIT, a Tanulmány és a VKKT becslések összehasonlítása, 2 x 1200 MW (milió \$ és milliárd Ft).

A 7.2 táblázatban a jelölések azonosak, mint a 7.1 táblázatban:

EGI FVR = A Tanulmány költségbevétele a  $\Delta t = 11^\circ\text{C}$ , kétlépcsős dunai vízkivételű frissvízhűtéses rendszerre (utóhűtő nélkül), VITUKI bevezetéssel) a 4.4.3-1. melléklet 3/6. oldal 6. oszlop alapján;

VKKT FVR = Általunk a fentiek alapján készített költségbevétele a  $\Delta t = 11^\circ\text{C}$ , kétlépcsős Dunai vízkivételű frissvízhűtéses rendszerre (utóhűtő nélkül, 1 parti + 2 merőleges mederbelti bevezetéssel);

EGI TIINH = A Tanulmány költségbevétele az 1. kötet 10.4-1. melléklet 5. oldala szerint.

Az elvégzett négy lépésből álló elemzés alapján a beruházási költségekre az alábbi megállapítások tehetők:

- [redacted]
- [redacted]
- [redacted]
- [redacted]

A beruházási költségek alapján - a fontos szempontok egyike - [redacted]

<sup>26</sup> A Tanulmányból átvett, vegyes költségek, lásd korábban is.

<sup>27</sup> A Tanulmány szerint [redacted] beruházást feltételezve, az interkaláris lényezővel [redacted] felsorozva.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

## 8. ÜZEMELÉSI ÉS ÉLETCIKLUS KÖLTSÉGEK

### 8.1 Bevezetés

Ebben a fejezetben először az életciklus költség számításával foglalkozunk. Ezt követően, a 2. fejezethez csatlakozva, további kritikai észrevételeket teszünk, specifikusan a Tanulmány üzemelési és életciklus költségeinek becslésével kapcsolatban. Ezután - és ez a fejezet fő célja - ellenőrző számításokat végzünk, miután a Tanulmány vonatkozó számításai nem egészen reprodukálhatók. Számos mellékterméke is lesz az elemzéseknek: trend- és érzékenységvizsgálatok, az éghajlat- és medermélyülés hatásainak feltárása.

A költségek becslésénél nem törekszünk a teljességre, csak a nagyobb tételeket vesszük számba. Ezek a termelhető energia csökkenése, az önfogyasztás és a vízzel kapcsolatos kiadások, amelyek együttesen az üzemelési költségek XXXXXXXXXX teszik ki. A hiányzó elemekre a Tanulmány értékeit fogadjuk el és így származtatjuk a teljes üzemelési és életciklus költségeket.

### 8.2 Az életciklus költség

A beruházás egyszeri (rövidtávú) költséget jelent (BK). Az üzemelés, karbantartás és javítás folyamatosan, évente jelentkező kiadást (OMRK) igényel az élettartam alatt. Valamely projekt esetében a különböző, szóba jöhető alternatívák általában eltérő BK-val, OMRK-val és élettartammal jellemezhetők. Ilyenkor az összehasonlítás céljára az évi összköltséget (ÉÖK) vagy az életciklus költséget használják (ÉcK). Előbbi az üzemelési költség és a beruházási költség - az élettartamot jellemző  $n$  év alatt kamatos kamattal - visszatérítendő hányadának az összege,

$$\text{ÉÖK} = \text{OMRK} + \alpha \text{BK}$$

míg utóbbi az élettartamra diszkontált összes költség jelenértékben kifejezve

$$\text{ÉcK} = \text{BK} + \beta \text{OMRK}.$$

Itt, ha az éves költségek állandók, az  $\alpha$  tőke-visszatérítési tényező

$$\alpha = r(1 + r)^n / (1 + r)^n - 1,$$

míg ennek reciproka

$$\beta = 1/\alpha,$$

ahol  $r$  a kamatláb vagy diszkonttényező. Amennyiben a beruházás megvalósítása több évig tart, BK-t is diszkontálni kell (ez vezet az ún. interkaláris tényező bevezetéséhez).

Látható, hogy ÉÖK és ÉcK egyenletei átrendezést követően megegyeznek. Mögöttük az a megfontolás áll, hogy valamely projekt megvalósítása általában kölcsönből történik, amit a kamatos kamat elvének megfelelően az élettartam alatt ( $n$  év) törlesztünk vissza. Valójában azonban olyan mérnöki-közgazdasági konvencióról van szó, ami több-szemponútú elemzés keretében segíti az ésszerű projekt vagy projektek kiválasztását. A finanszírozhatóság és a megvalósíthatóság egy következő, sokkal részletesebb vizsgálódás tárgyát képezi (és nem biztos, hogy az „optimális” megoldás finanszírozható is).

Látni kell azt is, hogy ÉÖK és ÉcK  $r$  és  $n$  értékétől függően kombinálja a különböző költség fajtákat és tulajdonságokat. Így például a jelen esetre, az irodalom az  $n = 20 - 30$ ,  $r = 0.05 - 0.10$  tartományt ajánlja. E szerint,  $\beta$  a 8.1 táblázat szerinti értékeket veszi fel.

n (év)		
r (-)	$\beta$	

8.1 táblázat:  $\beta$  érték n és r függvényében<sup>28</sup>

A Tanulmány - indoklás nélkül - [redacted] tételez fel, holott a fejlesztési elképzelés [redacted] évre szól. Így számos kérdés merül fel. Mi történik [redacted] múlva? És miután a gépészet élettartama általában közelebb van a [redacted] mint a [redacted] (úbb helyen utalás is van arra, mit kell korábban cserélni), hogyan veszik ezt figyelembe? Miért nem számolnak eltérő paraméterekkel – ahogyan ez szokásos – az építészetre és a gépészetre?

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

Mielőtt áttérünk az OMR költségek és a Tanulmány eredményeinek elemzésére, a gondolatmenetünket két megjegyzéssel zárjuk:

- Nem valószínű, hogy a kérdéses paksi beruházás a Tanulmány feltevésének megfelelően, [redacted] befejezhető. Így, BK diszkontált értéke a jelenleginél valamivel [redacted]. Ennek hatása azonban nem jelentős, ezért a továbbiakban nem foglalkozunk vele.
- Az üzemelési költség és a becslés hibája viszont az említett arányok miatt kiemelt figyelmet kell, hogy kapjon (lásd a Példát). [redacted]

<sup>28</sup> [redacted] az EGI mértani sorból számolta, ami kis mértékben eltér az [redacted] vonatkozó eredményétől. A konzisztencia érdekében megtartottuk az EGI által használt tényezőit.

### 8.3 A Tanulmány üzemelési- és ÉcK költség-becslése: észrevételek

A 2. fejezet észrevételeit itt továbbiakkal egészítjük ki:

- A konzorcium nagy volumenű, szerteágazó munkát végzett, sok hasznos részeredménnyel, eredménnyel és érzékenységvizsgálattal.
- A jelen fejezet mutatja majd meg, hogy a becslések mennyire elfogadhatók.
- A felülvizsgálatban - ahogyan már máshol is hangsúlyoztuk - [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED] így valamely „versenyképesebb” frissvízes változat tornyos megoldással való összehasonlítására közvetlenül nincsen mód. Ez (i) független számításokkal, (ii) az utóhűtős alternatívából levezetve illetve (iii) az első fázis eredményeinek felhasználásával végezhető el.
- A mátrixok előrelépést jelentenek a korábbi táblázatokhoz képest az összehasonlítás szempontjából, de a finomítás még szükséges lenne. A csoportosítás (mely tételeket von össze egy csoportba) újra és újra változik. [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]
- Fontos, hogy pontosan becsüljük a hőmérsékleti korlát miatt kieső energiát; a módszertan ismertetése a Tanulmányban nem szerepelt. A későbbi táblázatokban a VKKT oszlopok feltételezik, hogy a bevezetéssel elérhető olyan mértékű elkeveredés, mely mellett nincs szükség hőmérsékleti korlát miatti visszaterhelésre a jelenlegi környezeti szabályozás mellett.
- A Tanulmány ÉcK táblázatainak bal alsó blokkjában „Költségösszesítés” címén összeadja a Beruházási költségeket (mértékegysége: millió Ft) az üzemeltetési költségek két csoportjával (mértékegységük: millió Ft/a). Különböző mértékegységű számokat nem szabad összeadni: szerencsére ezeket az eredményeket később nem használják fel.
- Nem világos, hogy az elektromos kapacitás illetve a maximális vízhozam adatokból milyen tartósság alapján jönnek ki az éves értékek. [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]
- További, kisebb jelentőségű megjegyzések a következők: [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]

A fentiekén túl – ismételjük – a Tanulmány alapján nem reprodukálható az összes költségösszetevő becslése. Ezért a jelen fejezetben (dinamikus) ellenőrző számításokat végzünk, amelyek számos hasznos többlet eredményhez vezetnek majd.

### 8.4 A THNH üzemelési és ÉcK költsége (2 x 1200 MW)

#### 8.4.1 Az értékelés módszere

A hűtőtornyos megoldás értékelési módszere három, egymásra épülő lépésből áll:

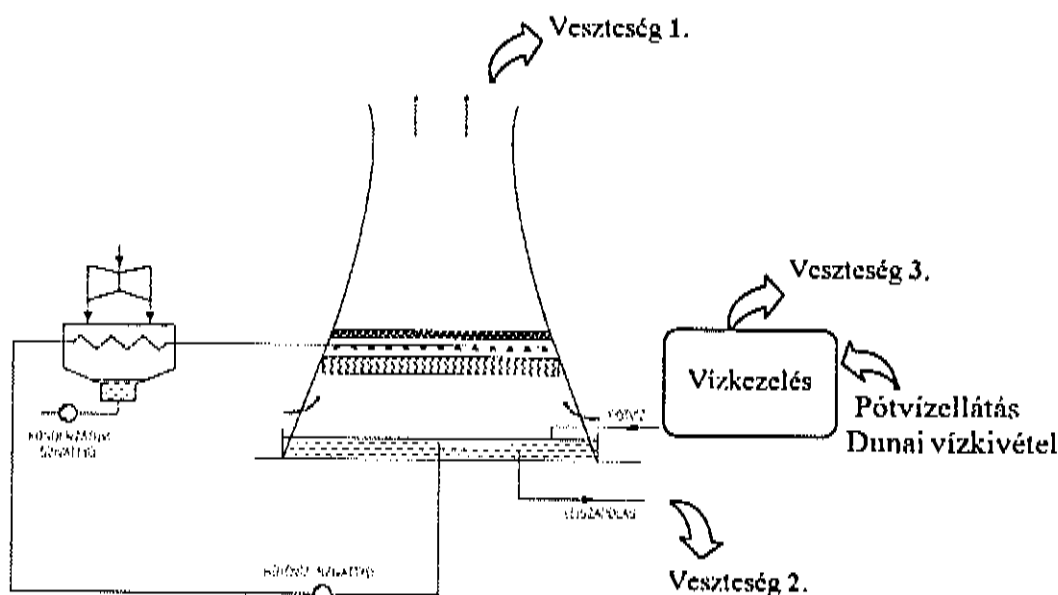
- (i) A fűtőrendszer energiateljesítményét és a meteorológia jellemzőitől függő hatásfokcsökkenésből keletkező, elmaradó energiatermelést az elmúlt 15 év<sup>20</sup> (1996–2010) szimulált működési eredményeivel jellemezzük.
- (ii) Korrelációs kapcsolatokat határozunk meg ezen évek jellemző léghőmérsékletei (éves, továbbá évszakos középhőmérsékletek) és a szimulációs eredmények között.
- (iii) A regionális klímaváltozási modell (4. fejezet) által előrejelzett éves illetve évszakos középhőmérséklet változásait behelyettesítve a regressziós egyenletekbe, a jövőben várható üzemi jellemzők becsült értékeit nyerjük.

A továbbiakban a számítások a fűtő rendszerre vonatkoznak, a segédhűtő rendszer fogyasztási adatait a Tanulmányból vettük át. A részleteket a 8.1 Melléklet tartalmazza.

#### 8.4.2 Költség- és veszteségforrások

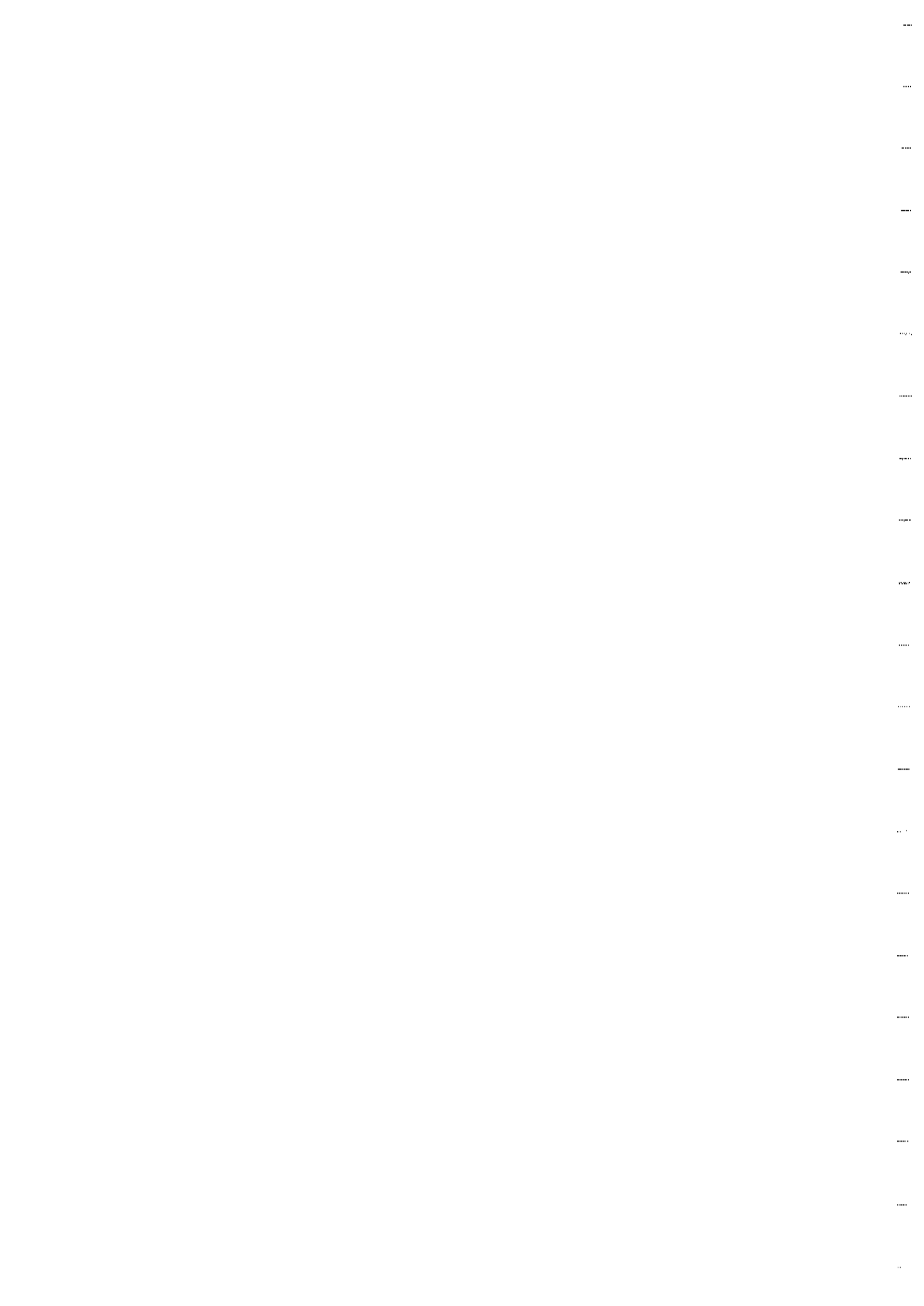
##### (A) A fűtőkör és a pótvezeték szivattyúinak önfogyasztása

A természetes huzatú, nedves hűtőtorony (8.1 ábra) önfogyasztást meghatározó paraméterei a következők: keringtetett hűtővízáram, emelési magasság és a beépítendő szivattyúk összhatásfoka (szivattyútelepi hatásfok), valamint a dunai vízállások (pótvíz).



8.1 ábra: A természetes huzatú, nedves hűtőtorony elrendezése

<sup>20</sup> Megfigyelések Paks térségére 15, 21, 37 és 61 évre álltak rendelkezésre, attól függően, hogy légköri vagy hidrológiai adatokról van-e szó és azokon belül milyen jellemzőkről. Az adatsorok közül mindig a célnak leginkább megfelelőt választottuk. Így adódnak például a 15 vagy 21 évre vonatkozó elemzések. Az egyes észlelési időszakok a következők: (i) 15 éves (1996 – 2010); (ii) 21 éves (1990 – 2010); (iii) 37 éves (1974 – 2010);, 61 éves (1950 – 2010).





### (B) Recirkulációs szivattyúk

Feltételezve, hogy az éves [redacted] [redacted] rendelkezésre állás során a szivattyúk azonos hűtővízáramot forgatnak, a recirkulációs szivattyúk önfogyasztására a meteorológiai paramétereknek nincs hatása. A pótvízellátásra szolgáló dunai átemelők azonban a Duna mindenkori vízállásától függő energiafelhasználással jellemezhetők.

A hűtővízáram az erőműre és [redacted] szivattyúra [redacted] [redacted] emelőmagasság mellett. A Tanulmány a kondenzátor szivattyúkra nem ad meg hatásfokgörbét. Tekintettel az állandó hűtővízáramra és a közel állandó emelési magasságra, valamint a nagyteljesítményű gépek általában jobb hatásfokára, átlagos összh hatásfoknak a minimálisan elvárható [redacted] vettük fel. [redacted]

A főhűtőrendszer recirkulációs szivattyúinak energiafogyasztásából – [redacted]

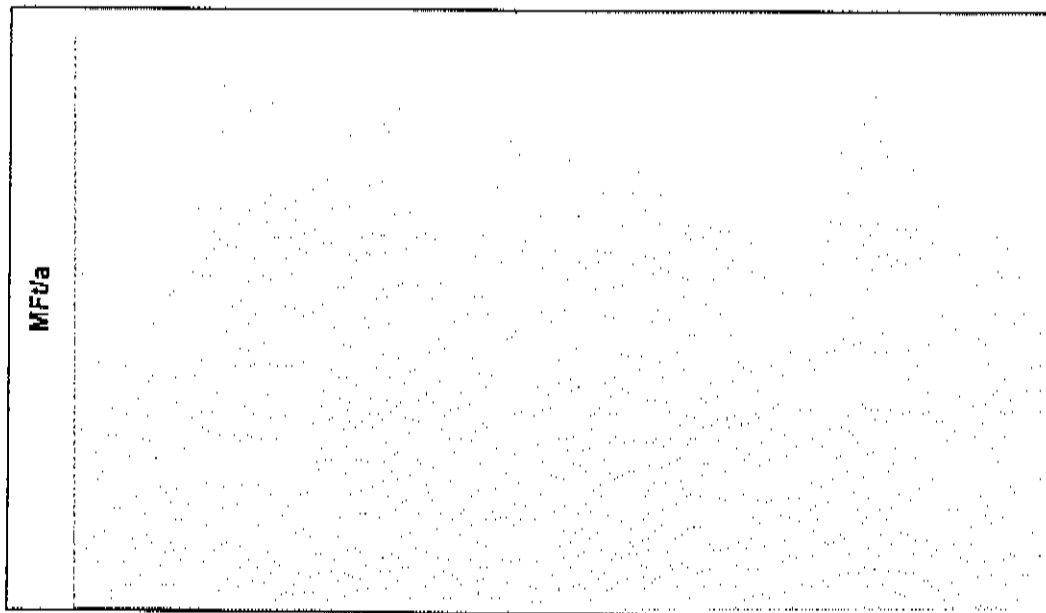
### (C) Pótvíz szivattyúk

A pótvíz szivattyúk energiafelhasználásának számításához ugyancsak hiányzik a hatásfokgörbe vagy kagylódiagram. Hasonlóan jártunk el, mint a frissvízhűtés dunai átemelőinél és itt is feltételeztük, hogy a szivattyúk [redacted] optimalizáltak. A pótvízarámra a Tanulmány több értéket is megad (8.1 melléklet), mi ezek közül [redacted]

A 8.1 melléklet szerint a dunai vízállásokra elvégzett számítások a szimulációs időszak átlagában [redacted]

Az önfogyasztás és a költségének változása 21 év átlagos dunai vízállásainak függvényében jó közelítéssel lineáris (utóbbit a 8.2 ábra szemlélteti).





8.2 ábra: A pótvízszivattyúk energiatöltése a dunai éves átlagvízszint függvényében

#### (D) Vízhatszárítás

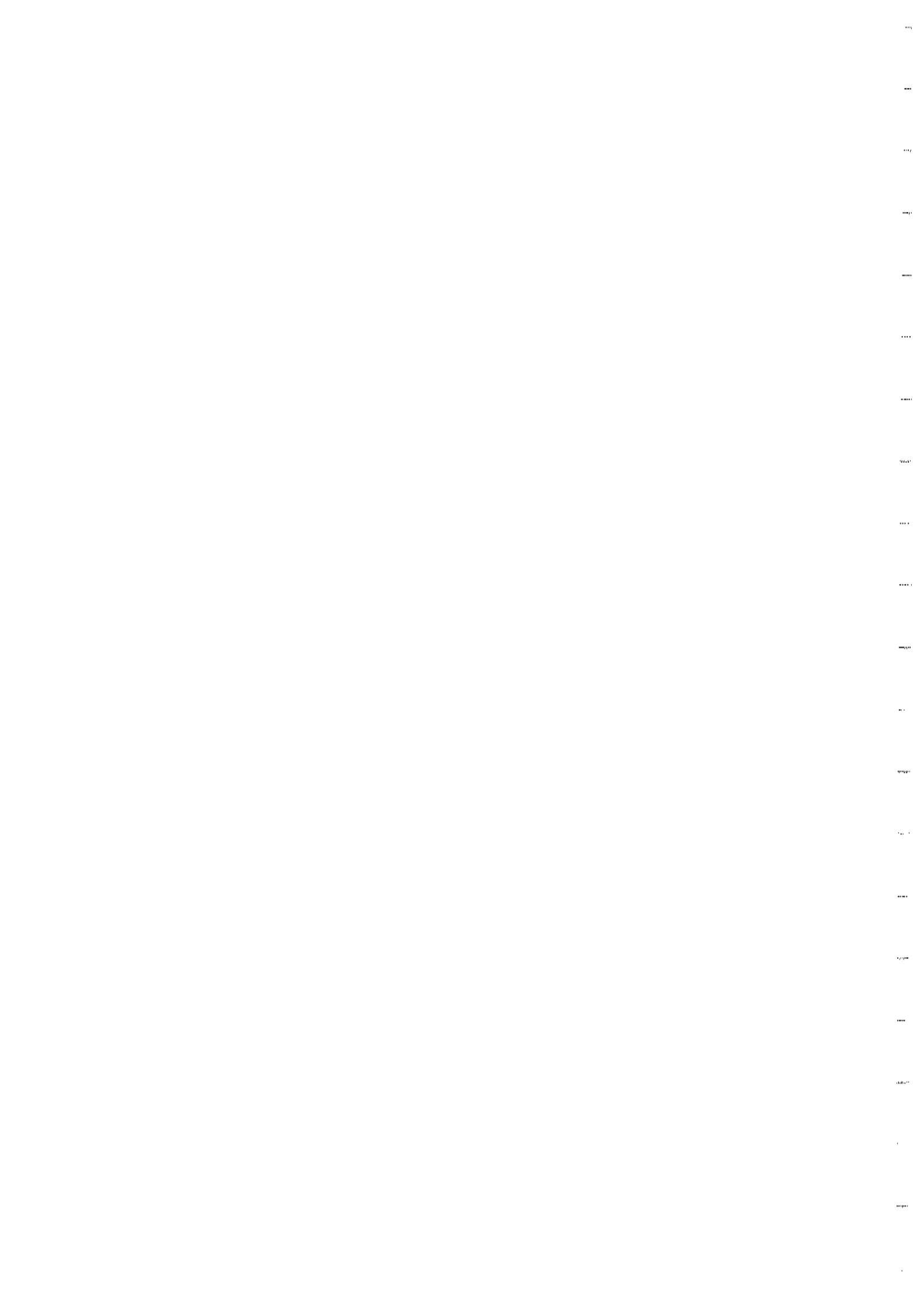
A folyamatos üzemnél pótlendő vízmennyiséget a recirkulációs rendszer- és a vízkezelés veszteségei képezik. További költségátétel a kivett és visszavezetett, tehát nem veszteséggént jelentkező vízmennyiség. A vízhasználatához köthető költségek a vízkészlethasználati járulékokkal számíthatók. A pótvíz mennyisége fedezi a hűtési rendszer veszteségeit, kivéve a vízkezelésnél keletkező és elszállított iszap víztartalmát (8.1 ábra, Veszteség 3.), amivel nem számolnak. A Tanulmány a pótvízárámra több értéket is megad (8.1 melléklet első lábjegyzete).

A recirkuláció során folyamatos párolgási és cseppvesztés (Veszteség 1.) lép fel (a [redacted]). Amint az a Tanulmányból idézett mennyiségekből (8.1 melléklet első lábjegyzete) látható, a pótvíz kivétel és a veszteségek között nem állítható fel anyagmérleg, az adatok ellentmondásosak. Számításainknál végül a 2.4 m<sup>3</sup>/s pótvízárámot fogadtuk el.

A leiszapolás (Veszteség 2.) a Tanulmány szerint a Dunába visszavezethető, vagy közsatornába bevezethető [redacted].

A várható szennyezők közé tartozik a maradék biocid és a szervesanyag tartalom. Mindkét említett potenciális befogadónál az elsőszámú probléma a biocid. A maradék biocidtartalom

<sup>30</sup> Jogi alapja ismeretlen. [redacted]



még a közsatornában sem fogadható, mert tönkreteheti a biológiát a szennyvíztisztító telepen. Ugyan a Tanulmány szerint a recirkuláltatott vizet olyan biociddal fogják kezelni, amely lebomlik, a kérdés azonban az, hogy mennyi idő kell ehhez. Már most – a döntéselőkészítés szintjén – részletes vizsgálatokat tartunk szükségesnek a költségek feltárására, majd a hatósági engedély megszerzéséhez.

Összességében a leiszapolási víz minősége nem ismert, a kezelés nélküli Dunába vezethetősége előzetes hatósági állásfoglalást igényel. Ennek hiányában nem visszavezethetőnek tekintjük és vízhasználati költségeit is ekként számoljuk, de adathiány miatt nem vesszük figyelembe a kezelésének/elhelyezésének vagy tisztításának költségeit.

Az ellentmondásos adatok (8.1 melléklet) nem befolyásolják a vízkészlethasználati költségek meghatározását, mivel megítélésünk szerint – ellentétben a Tanulmány megállapításával – a leiszapolás nem kerülhet a Dunába vissza, tehát a teljes pótvíz mennyiségére [REDACTED] fajlagos költséggel kell számolni.

A fentiek tükrében a vízhasználat költsége a teljes pótvíz mennyiségre vonatkoztatva [REDACTED]

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

#### (E) A vízkezelésből származó iszap

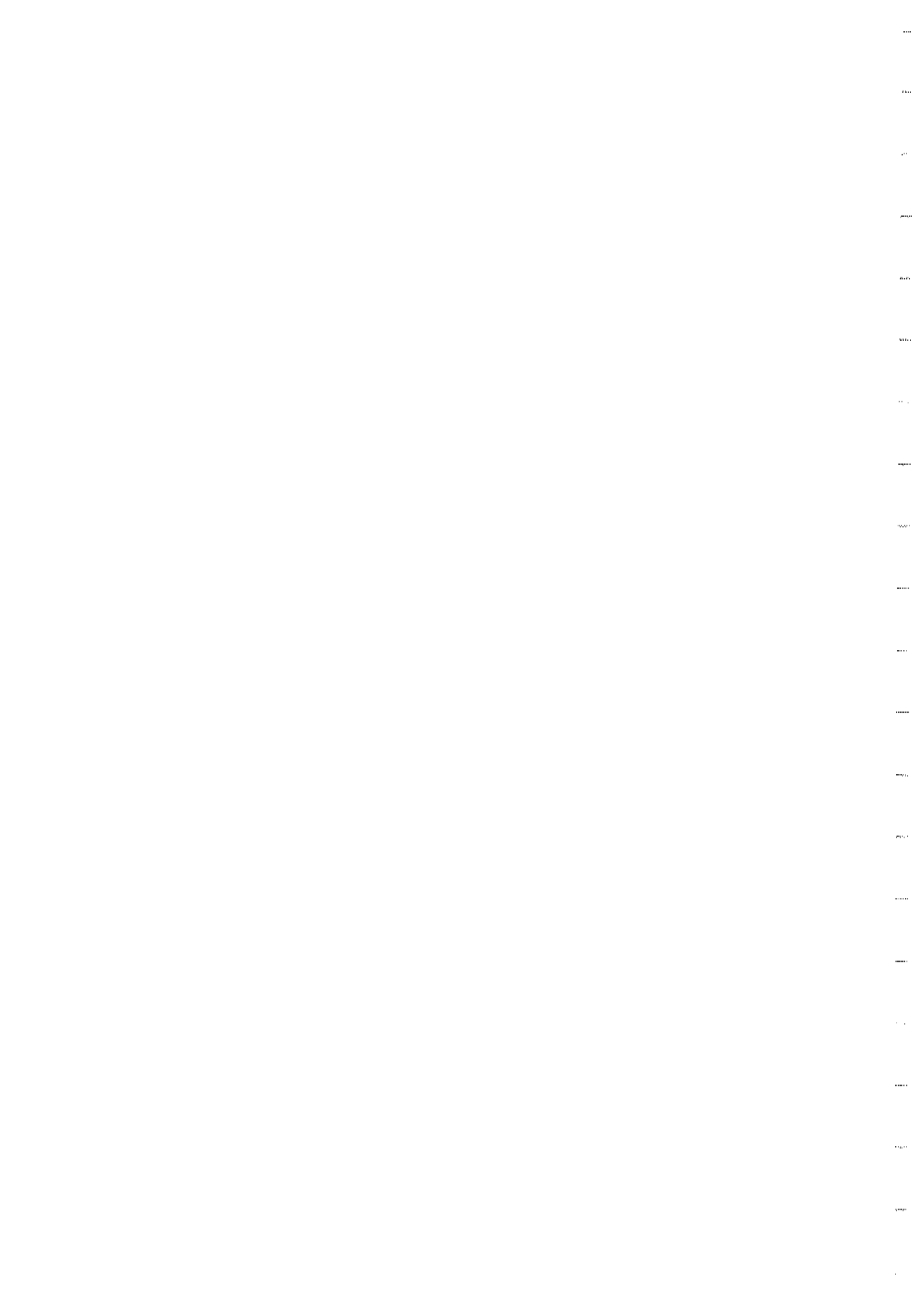
A meszes vízlágyítós kezelés során naponta [REDACTED]

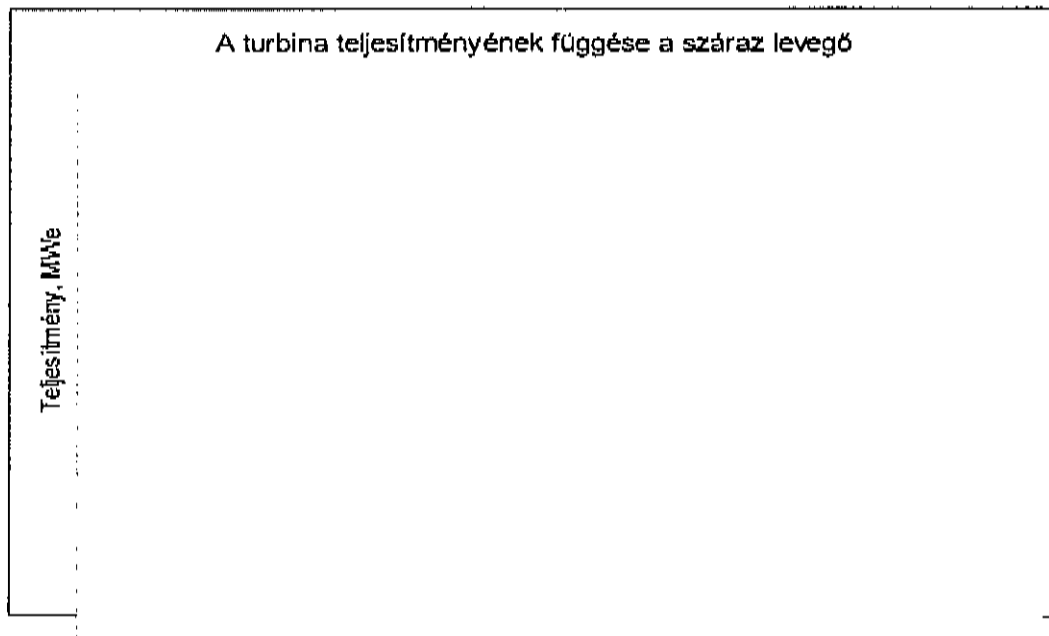
A költség meghatározásnál (Tanulmány 1. kötet 218. oldal) a kezelt pótvíz térfogatára [REDACTED] Ennek helyessége a lerakóhely ismeretének hiányában (van-e meglévő és az milyen távolságban, ha nincs hol létesíthető, és ekkor még beruházási költség is jelentkezik) ebben a kidolgozottsági fázisban nem ellenőrizhető. Részletes vizsgálatok szükségesek.

A vízkezelésből származó iszap elhelyezés költsége – [REDACTED]
---

#### (F) Termelés kiesés

Az OMSZ paksi meteorológiai állomásának az 1996–2010 évek óránkénti száraz léghőmérséklet és relatív páratartalom adatai, valamint a Tanulmány által megadott, egy turbinára vonatkozó hatásfok - száraz levegőhőmérséklet kapcsolat (8.3 ábra) felhasználásával kiszámítottuk, hogy a fenti 15 évben hogyan alakult volna egy blokknál a napi átlaggal számolható képest a termelt villamos energia.



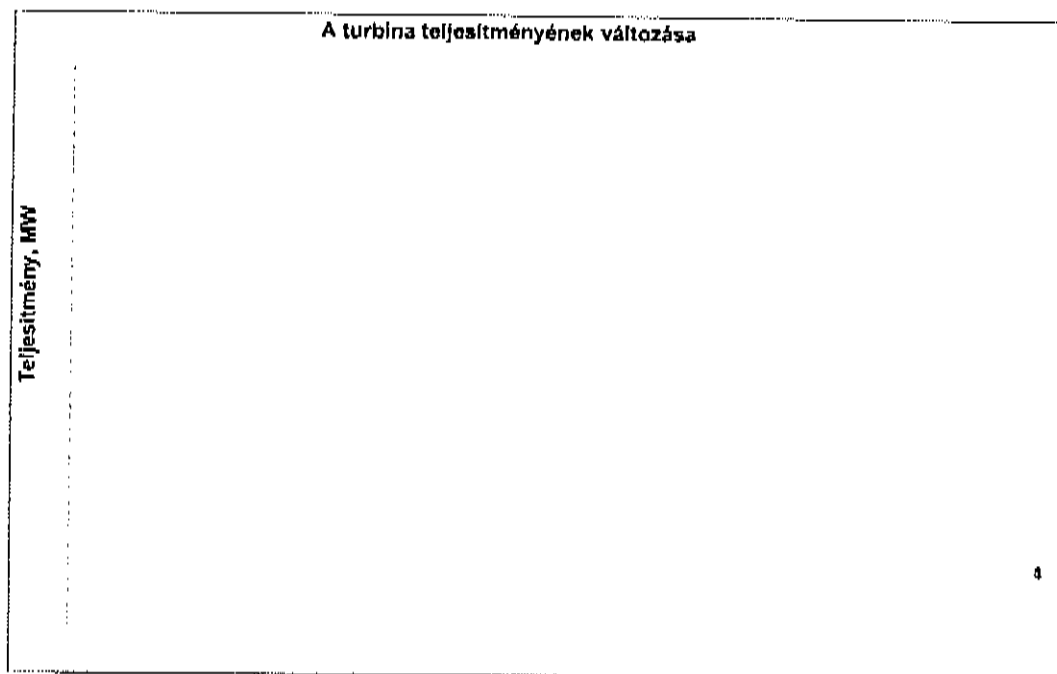
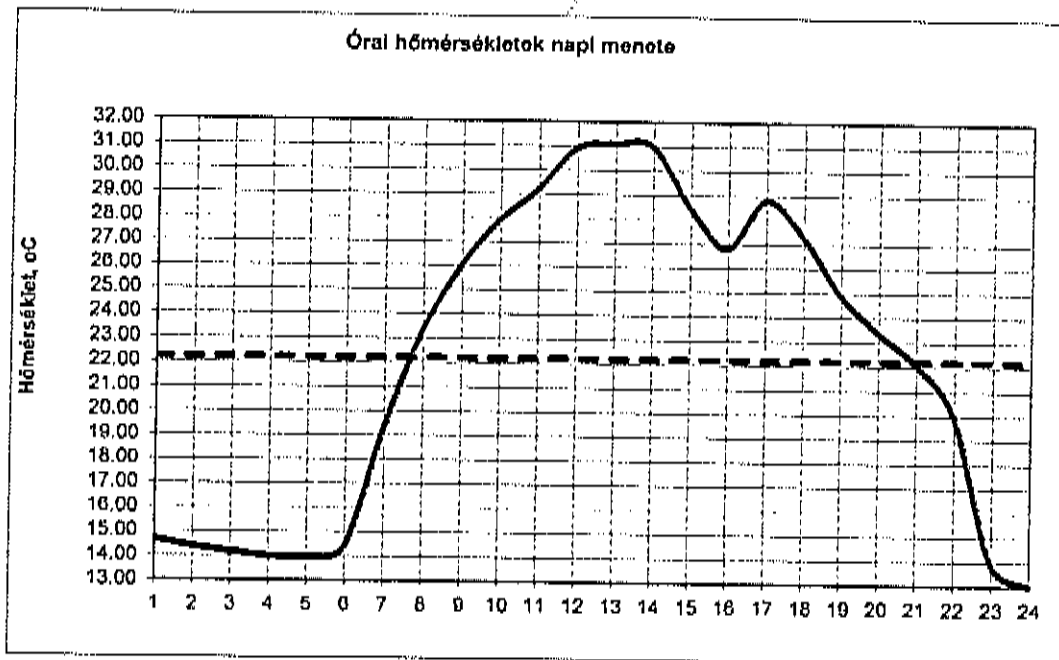


**8.3 ábra: A turbina teljesítményének változása a száraz levegő hőmérsékletének függvényében**

Az 8.3. ábrából érzékelhető, hogy a turbina által leadott teljesítmény érzékeny a kondenzátorbeli hőmérsékletre: a hűtővíz hőmérséklete néhány perces késéssel követi a léghőmérséklet (valójában természetesen a nedves levegő) hőmérsékletének változását. Mivel a teljesítményváltozás a száraz levegő hőmérsékletére vonatkozik, a mindenkori teljesítményt ennek függvényében számítottuk.

A Tanulmányban a napi középértékekkel számolt évi veszteséget tüntették fel. A hőmérsékletemelkedésnek / -eszkkenésnek az energiatermelésre gyakorolt hatása azonban nem szimmetrikus. Például egy nap folyamán az éjszakai hidegebb levegőhöz tartozó jobb hatásfok nem kompenzálja a nappali melegben kicső veszteségeket. Ezt láthatjuk a 8.4 ábrán, ahol egy nyári nap óránkénti hőmérsékleteihez, majd a napi átlaghőmérsékletéhez is meghatároztuk a teljesítményeket.

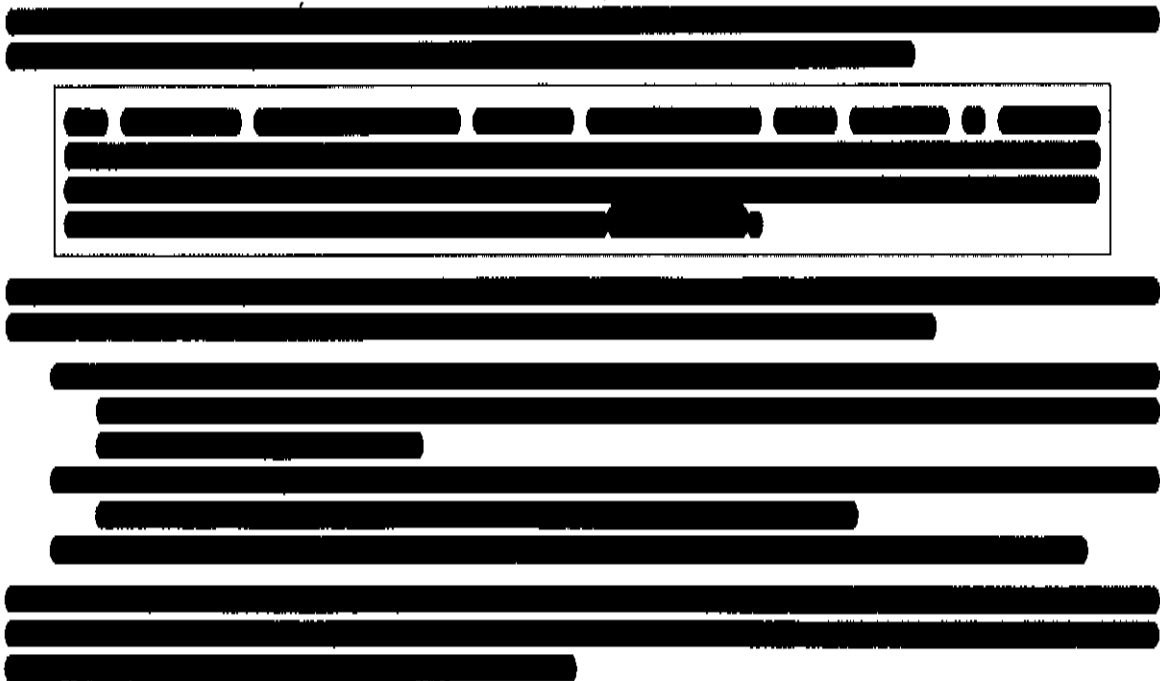




8.4 ábra: A turbina teljesítményének változása egy nap folyamán  
 ----- Átlagból számítva      \_\_\_\_\_ Órás értékekből számítva

<sup>31</sup> Az energiacsökkenés, vagy a kieső energia a névleges kapacitáshoz képest, a turbina jelleggörbéje szerint, a kondenzátor hőmérsékletének emelkedésével bekövetkező hatásfokromlás miatt jelentkezik.





A számított költség fajtákat a 8.2 táblázat összesíti. Ezeket emeljük majd át a 8.3 táblázatba az OMR és ÉcK költségek meghatározásához.

Költségfétel (THNH)		
1. Recirk. szivattyúk		
2. Pótvíz szivattyúk		
3. Vízkészlehasználati díj		
4. Pótvízkezelés (iszapelhelyezés)		
5. Elmaradó energiatermelés		
6. Összesen		

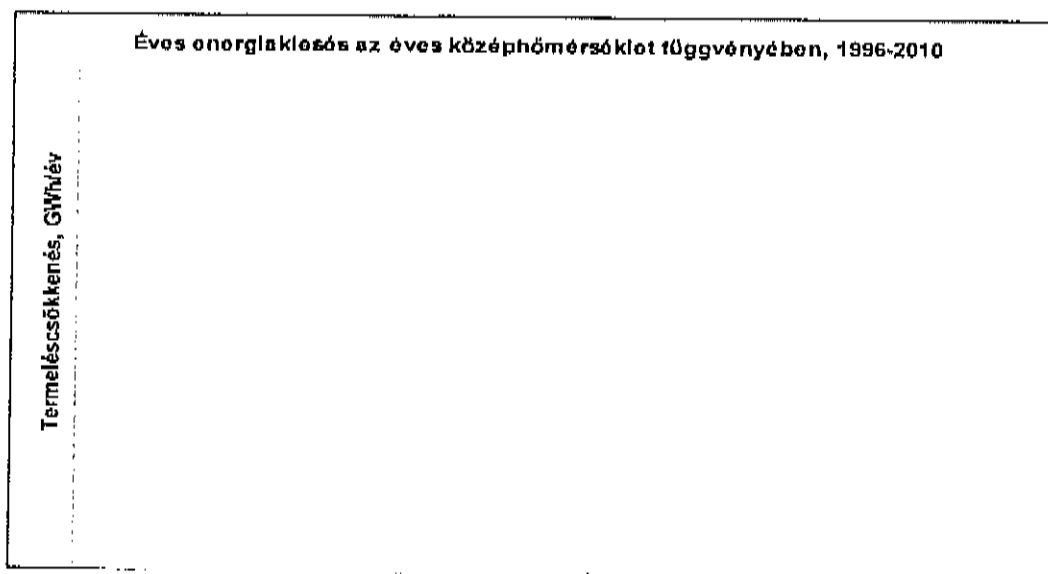
8.2 táblázat: THNH üzemelési költség összetevők 15 év átlagában

#### 8.4.4 A kicső energia és a léghőmérséklet kapcsolata

Elfogadható korrelációs tényezők mellett egyértelmű kapcsolatokat találtunk az órai léghőmérsékletekkel számított, kicső energia-mennyiség és az átlaghőmérsékletek között (8.5 ábra és 8.1 melléklet). Különösen szoros kapcsolat volt kimutatható a nyári hónapokra, amik egyébként az éves veszteség tekintetében meghatározók. A 8.5 ábrán figyelemre méltóak az igen meleg nyarú évek veszteségei. Az eredményeket az éghajlatváltozás hatásának megítélésére fogjuk felhasználni.

<sup>32</sup> A számítás módszerét a 8.1 Melléklet 2.4 pontja tartalmazza.





8.5 ábra: Az évi középhőmérséklet és az éves energiaveszteség kapcsolata

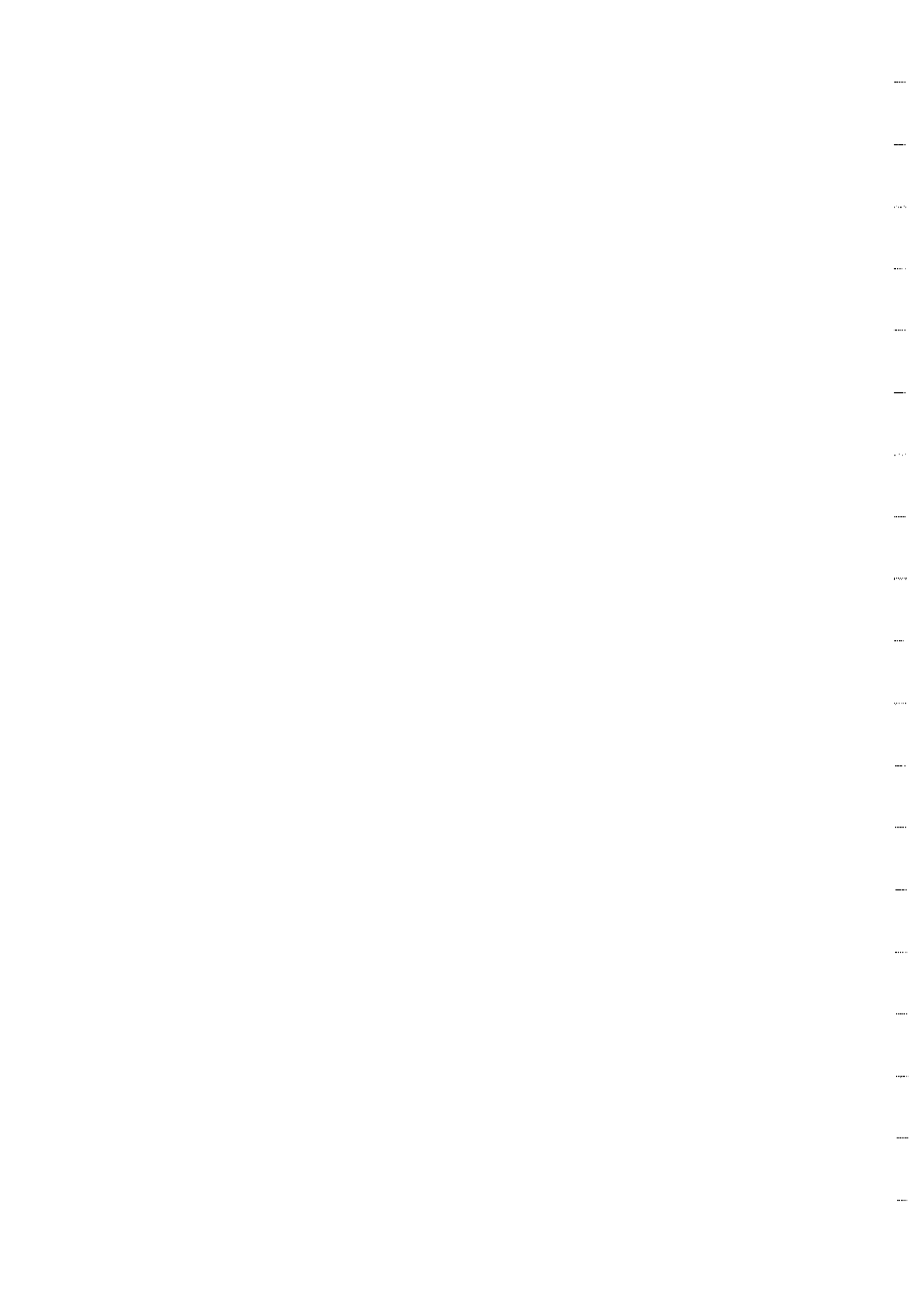
#### 8.4.5 Trendvizsgálat

A hűtőtornyos rendszer érzékeny a hőmérsékleti viszonyok alakulására. A veszteség idősoros ábrázolása a vizsgált legutolsó 15 évben, éves átlagban és évszakonként is növekvő trendet sugall<sup>33</sup> (lásd példaként a 8.6 ábrát). Amint az várható, a trendet a nyári hónapok erős növekedése határozza meg (8.1 melléklet).

[REDACTED]



<sup>33</sup> A csekély korrelációs tényező óvatosságra int az eredmények kiterjesztésében.



#### 8.4.6 Összefoglalás: üzemelési és ÉcK költségek (1990–2010)

A természetes huzatú nedves hűtőtornyos rendszer üzemelési költségeit a bemutatott eredmények, valamint a Tanulmányból átvett adatok felhasználásával a 8.3 táblázatban foglaljuk össze.

Változat	EGI THNH		VKKT THNH	
	[GWh, millió m <sup>3</sup> ]	[millió Ft]	[GWh, millió m <sup>3</sup> ]	[millió Ft]
Energiacsökkenés [GWh]				
Rendelkezésre állás csökkenés [GWh]				
Önfogyasztás [GWh]				
Pótvízkezelés [millió m <sup>3</sup> ]				
Pótvízkezelés [millió m <sup>3</sup> ]				
Segédhűtő, összes				
Karbantartás				
Személyzet				
OMR-összesen, egy évre				
Összesen 30 évre				
Beruházási költség, diszkontált				
ÉcK 30 évre				

8.3 táblázat: A Tanulmány és a VKKT természetes huzatú nedves hűtőtornyos üzemeltetési költségeinek összehasonlítása.<sup>34</sup>

A legelső három sor kivételével az adatok egy évre vonatkoznak.

Jelölések a 8.3 táblázatban:

EGI THNH = A Tanulmány 10.4-1. melléklet 5. oldala, valamint a 10.4-2. melléklet 3. oszlopa szerinti becslés

VKKT THNH = VKKT becslése az előzőekben ismertetett módon (2 x 1200 MW).

Rendelkezésre állás csökkenés: [REDACTED]

\*A Tanulmányból átvett, nem ellenőrzött adat. Az első öt tétel a 8.2 táblázatból átvett, számított érték.

A természetes huzatú nedves hűtőtornyos rendszer üzemeltetési költségeit vizsgálva az alábbi megállapításokat tehetjük.

(a) [REDACTED]

(b) [REDACTED] A hulladékkehelyezés költsége tág tartományban változhat, a szóba jövő megoldásoktól függően. Ezek további vizsgálatot igényelnek. Egyelőre mégis elfogadtuk a Tanulmány által megadott egységárakat, és mindössze a mennyiségek felülvizsgálatát

<sup>34</sup> Az eredmények GEA turbinára vonatkoznak, [REDACTED] névleges teljesítményre. Az FVR esetében az EGI becslés GEA turbinára, míg a VKKT MFT berendezésre [REDACTED] érvényes (8.5 táblázat és 8.1, 8.2 mellékletek).

végeztük el (és megpróbáltuk megszerezni a Tanulmány által használt sokféle mennyiséget). Ezek eredményeképpen megállapíthatjuk, hogy a pótvíz-kivétel és a vízkezelés költségét a Tanulmány összesen [REDACTED] [REDACTED]

(c) Az energiacsökkenés általunk számított értéke [REDACTED]

(d) A Tanulmány szerint a Rendelkezésre állás csökkenés = [REDACTED] [GWh/a], ahol

$p =$  [REDACTED] THNH esetén,

$p =$  [REDACTED] FVR esetén, valamint

[REDACTED] = „A hűtőrendszer és a gőzturbina együttműködéséből adódó éves áramtermelés, [REDACTED] kihasználási tényező figyelembe vételével”.

Az anyag nem tér ki arra, hogy miért különböző „p” értéke FVR és THNH esetén. Számításainkban (8.3 táblázat) [REDACTED] számoltunk mind FVR, mind THNH esetén. Természetesen az „EGI” oszlopokban a Tanulmányból átvett számok maradtak. A THNH esetén ebből a különbségből fakadóan az üzemeltetési költségek évente [REDACTED]

## 8.5 Az FVR rendszer üzemelési költsége

### 8.5.1 Az értékelés módszere

Az értékelés a nedves hűtőtornyos változathoz hasonlóan történt: a módszertani alapot az alábbi három fő lépés képezte:

- (i) A Tanulmányban közölt tervezési adatok felhasználásával modelleztük a hűtőrendszer működését 21 év (1990 - 2010) napi, paksi dunai vízállás és hőmérsékleti adatsoraira, mint üzemelési feltételekre, és számítottuk a keletkező üzemköltségeket.
- (ii) Meghatároztuk az idősorok statisztikai jellemzőit és a trendeket. Ezeket kapcsolatba hoztuk az üzemköltségek alakulásával.
- (iii) A Duna vízállásának és hőmérsékletének (a statisztikai jellemzőknek) a klimaváltozásból becsülhető módosulása lehetőséget nyújtott a hűtőrendszer jövőben várható üzemköltségeinek becslésére.

A részletek a 8.2 mellékletben találhatók.

### 8.5.2 Költség és veszteségforrások

A főhűtőrendszer üzemelési költsége az alábbi öt tétel összege:

- Az erőmű visszaterhelése miatt kieső energia ára, ami akkor jelentkezik, amikor a tervezett hűtőrendszer a mindenkori elkeveredési feltételek mellett sem képes biztosítani a Duna ellenőrzési szelvényében a víz hőmérsékletének megengedett legnagyobb értékét.
- A turbinák névleges teljesítményének csökkenése miatt kieső energia ára; ennek mértéke a mindenkori hűtővíz hőmérsékletének és a turbinák karakterisztikájának függvényében számítható.
- A kondenzátori szivattyúk önfogyasztásának költsége a szivattyúk Q - H görbéjének, hatásfokának, a szükséges emelési magasságnak és a mindenkori hűtővíz hozamának alapján vezethető le.