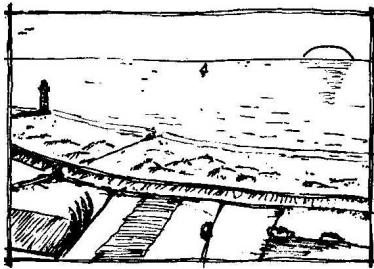


## 15. SZERKEZETEK VIZSGÁLATA SZÉLTEHERRE

### 15.1. Szerkezetek vizsgálata szélirányú teherre

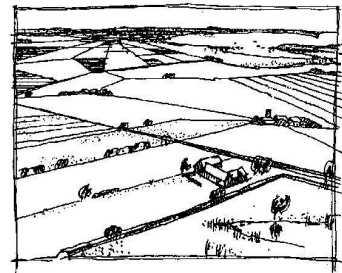
#### 15.1.1. Az átlagos szélsébség

A feladat vizsgálata igen összetett és gazdag irodalma van. Terjedelmi okok miatt a dinamikai vizsgálatokhoz szükséges minimális ismereteket tárgyaljuk, nagyban támaszkodva Zuranszki könyvére [13]. A szabályzatok közül elsősorban a 2007-ben életbelépett MSZ EN 1991-1-4:2007 szabályzatra (a továbbiakban Eurocode) és az abban található Nemzeti mellékletekre (a továbbiakban NA) fogunk hivatkozni. Esetenként utalunk azokra a többlet adatokra is, amelyeket ennek előszabványában az MSZ ENV 1991-2-4:1999 (a továbbiakban ENV)-ben találhatók. Ugyancsak említeni fogunk az MSZ 15021-1:1986 szabályzatban található (a továbbiakban MSZ), és még régebben alkalmazott néhány egyéb előírást is.



0. beépítettségi osztály

Tengeri, tengerparti terület



I. beépítettségi osztály

Tavak, sík terület elhanyagolható növényzettel, akadályok nélkül.

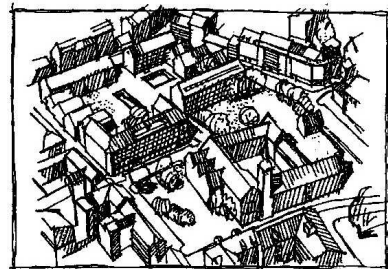
II. beépítettségi osztály

Kevés növényzettel borított terület, elszórt épületek, fák.



III. beépítettségi osztály

Egyenletesen fedett falusi, elővárosi, erdős terület



IV. beépítettségi osztály

Átlagosan a 15 m-t meghaladó épületekkel, legalább 15%-os beépítettségi terület.

15.1. ábra. Beépítettségi osztályok az Eurocode szerint

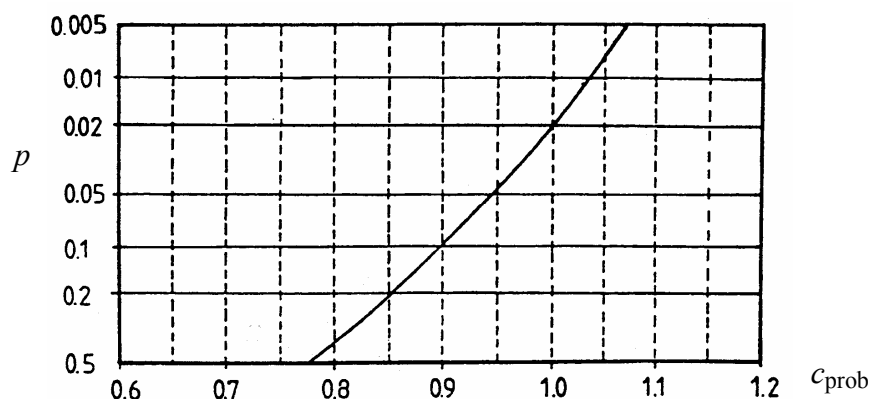
A szélteher a légáramlásnak a szerkezetre gyakorolt mechanikai hatása. A szél a földfelület napsugárzás okozta egyenlőtlen felmelegedése következtében előálló légnyomás-különbségek hatására jön létre. A szélesebesség a nyomás hosszegységre vonatkozó változásától függ. Ez az elméletileg számítható szélesebesség (gradiens szél) csak a földfelülettől több száz méterre (250-500 m) - az atmoszférikus határretegben kívül - érvényes. A felszín közelében lévő határretegben - a súrlódási erők következtében - a felszín feletti magasság csökkenésével a szélesebesség csökken.

Az, hogy a szélesebesség milyen magasságban éri el a gradiens szél nagyságát, és eközben milyen függvény szerint változik, az a felszín beépítettségétől függ. Az Eurocode beépítettségi osztályai a 15.1-es ábrán láthatók. (A különböző osztályok részletes leírását, a köztük lévő átmenetek kezelését a szabályzatban megtaláljuk.) Az Eurocode a szélesebesség  $v_{b,0}$  kiindulási alapértékét a II-es beépítettségi osztályra adja meg.

A vizsgálatoknál egy fontos kérdés, hogy milyen valószínűséggel lehet egy bizonyos szélesebességre vagy a túllépésére számítani. Az olyan terhek esetén, amelyek az építményben kárt okozhatnak, természetesen meg kell követelni, hogy az építmény használati ideje alatt ezen terhek az adott értéknél nagyobb valószínűséggel ne keletkezzenek. (A valószínűség ismeretében a mindennapi gyakorlat használja az ismétlési időköz fogalmát, ami természetesen nem jelenti azt, hogy az adott szélesebesség szabályos időközönként fordul elő). A szabályzatok (Eurocode, MSZ) a szélesebesség  $v_{b,0}$  kiindulási alapértékét az 50 éves átlagos visszatérítési idő (évenkénti  $p=0.02$ -es éves meghaladási valószínűség) esetére adják meg. A szélesebesség alapértéke változhat, ha az éves meghaladási valószínűség változik. Az Eurocode szerint a  $c_{\text{prob}}$  valószínűségi tényező, amivel a  $v_{b,0}$  értékét szorozni kell:

$$c_{\text{prob}} = \left( \frac{1 - K_1 \ln[-\ln(1-p)]}{1 - K_1 \ln[-\ln 0,98]} \right)^n \quad (15.1)$$

Az Eurocode által javasolt állandók:  $K_1 = 0,2$  és  $n = 0,5$ , de az egyes országok ettől eltérő értékeket is megadhatnak. (Az ENV-ben, pl. Hollandia a  $K_1$  értéket az ország három területosztályára adta meg 0,2; 0,234 és 0,281-es értékkel). A (15.1) alapján számítható valószínűségi tényezőt a  $p$  függvényében a 15.2-es ábra mutatja [8]. Az MSZ ezt a hatást - 5 évnél kisebb élettartamú építmények esetén - a szélesebesség segítségével számított szélterhelés biztonsági tényezőjének a csökkentésével veszi figyelembe.

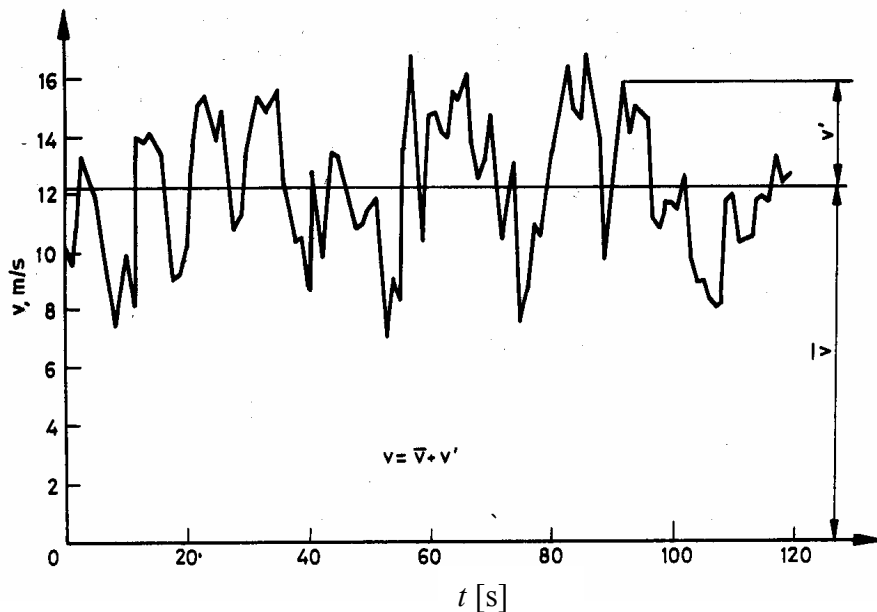


15.2. ábra. A szélesebesség éves meghaladási valószínűségi tényezője

A szerkezetek szélterhelésének vizsgálatánál nyilván nem a gradiens szél játszik szerepet. A különböző előírások (Eurocode, MSZ) a szélesebbég kiindulási alapértékét a felszín feletti 10 m-es magasságban adják meg. A szél sebességét és irányát az atmoszférában folyó légcirkuláció, a helyi termikus viszonyok és a terepegyenetlenségek befolyásolják.

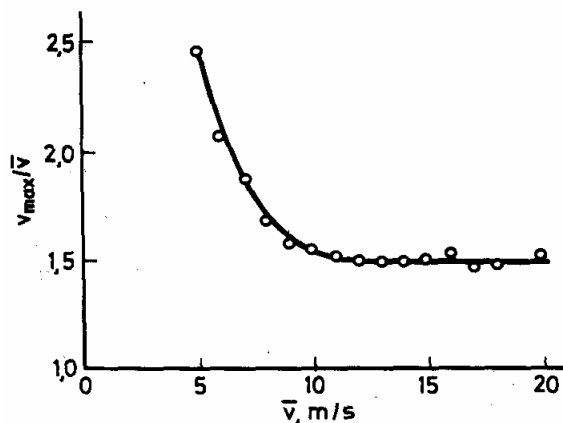
A szélviszonyok változása a nagy légtömegre kiterjedő áramlási struktúrák következtében aránylag lassan, órák, vagy napok alatt megy végbe. A terepegyenetlenségek, az épületek és a termikus jelenségek viszont szélleökéseket idéznek elő, amikor is a szél sebességében és irányában időbeni változások következnek be, amit turbulenciának nevezünk.

Ennek megfelelően a szélesebbég két összetevőből építhető fel: az időbeli átlagos sebességből és az ingadozó sebességből (15.3-as ábra [13]).



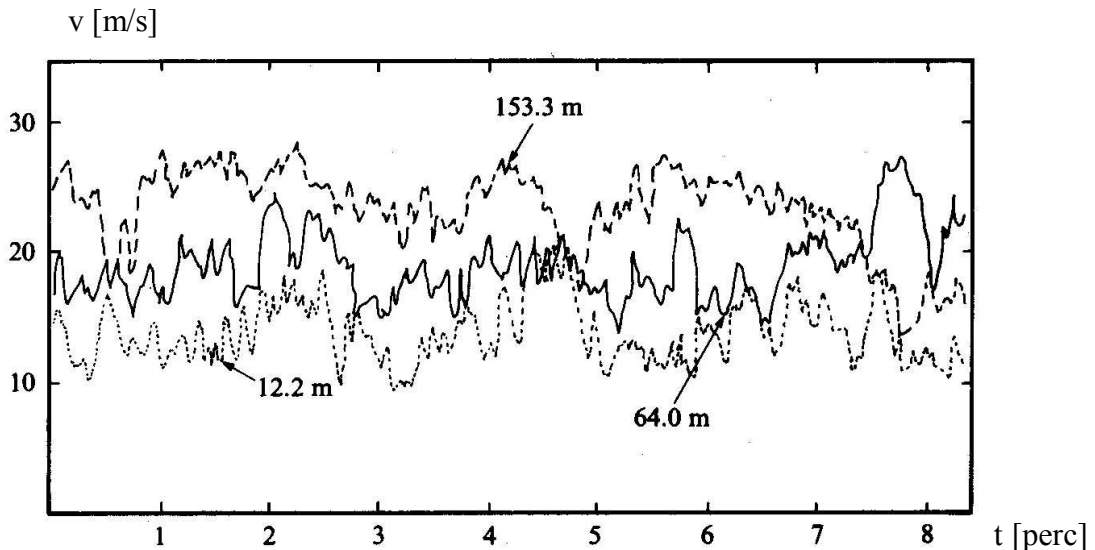
15.3. ábra. A szélesebbég időbeni változása egy pontban

A maximális szélesebbég és az átlagos szélesebbég hányadosa az ún. szélleökéstényező, amely függ az átlagos szélesebbég számításánál alkalmazott időtartamtól és az átlagos szélesebbég nagyságától. Minél nagyobb az átlagos szélesebbég (vagyis a hányados nevezője), annál kisebb a szélleökéstényező (15.4-es ábra [13]).



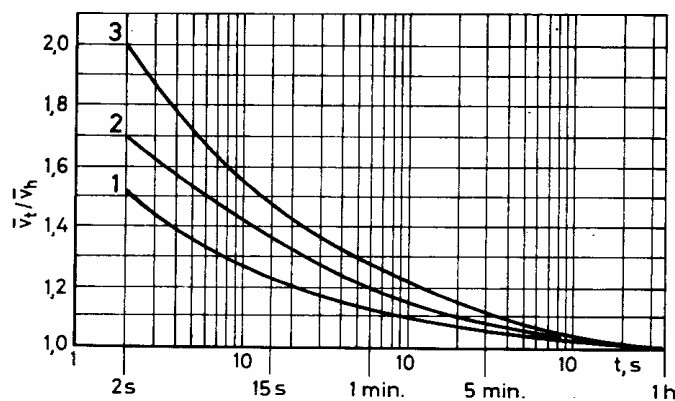
15.4. ábra. A szélleökéstényező

Mivel a pillanatnyi szélsebesség ingadozásokat a terep egyenetlenségei, a növényzet és az épületek is okozzák és ez a hatás a magassággal csökken - valamint az átlagos szélsebesség a magassággal növekszik - a szélökéstényező a magassággal csökken. A szélsebesség változását mutatja be különböző magasságokban a 15.5-ös ábra [4].



15.5. ábra. A szélsebesség változása különböző magasságokban

A szélsebesség  $v_{b,0}$  kiindulási alapértéke a szélsebességnek a széliránytól és az évszaktól független, a II-es beépítettségű osztályhoz tartozó terep szintje feletti 10 m-es magasságban mért 10 perces átlagos szélsebesség karakterisztikus értéke. A 15.6-os ábrán látható, hogy ez az érték hogyan függ attól, hogy milyen hosszúságú időtartamra számítjuk az átlagot. Az MSZ a számítások alapjául szolgáló szélsebességet a 3 s-ig tartó szélökés alapján adta meg, amelyhez lényegesen nagyobb szélsebesség tartozik, mint amit az Eurocode megad, amint azt a 15.6-os ábra mutatja [13]. Az ábrán az 1-es jelű görbe a síkvidéken, a 2-es jelű a falusi környezetben, míg a 3-as jelű a városközpontokban lévő átlagos szélsebességek változásának arányait mutatja be. (Természetesen a két különböző szabályozási rendszer más pontjain is van különbség, ami az elmozdulások számítása során a szélsebesség előírt alapértékében eltérést okoz).



15.6. ábra. A  $t$  időtartamra vonatkozó átlagos szélsebesség arányai

A  $v_{b,0}$  értéke országonként (sok esetben egy országon belül is) változó, és ennek megadása az egyes országok feladata. Az ENV-ben volt található az 15.7-es áttekintő ábra. A  $v_{b,0}$ -nak az NA által Magyarországra megállapított értéke 23,6 m/s.



15.7. ábra. Európa széltérképe

A szélsébség alapértéke az Eurocode jelölései szerint:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (15.2)$$

A (15.2)-ben szereplő tényezőkre az Eurocode 1,0-t ajánl és az ENV-ben a legtöbb ország esetében ezek a tényezők 1-el is voltak egyenlők, így  $v_b$  megegyezett a  $v_{b,0}$  értékével.

A  $c_{dir}$  iránytényező a szélsébségnek az égtájak szerinti iránynak megfelelő eltérésére utal (az ENV-ben pl. Belgium esetén a keleti irányban a  $c_{dir}$  0,894 és a többi irányban 1, Angliában 30°-ként 0,76 és 1,05 között változott). Az NA azon megfontolás alapján, miszerint egy adott irányú szél előfordulásának valószínűsége kisebb, mint egy tetszőleges irányban ható szélnek, a  $c_{dir}$  iránytényezőt 0,85-re vette fel.

A  $c_{\text{season}}$  évszaktényező az adott időtartamra létrehozott létesítményekre vonatkozik. Az évszaktényező az ENV-ben Németországban az 1 napos létesítménynél 0,5, a négy évnél rövidebb élettartamúaknál pedig 0,8, de akár egy adott éven belül egy adott évszakhoz is tartozhat (pl. Belgium esetén az 1 hónapra tervezett létesítményeknél május és augusztus között 0,671, novemberben pedig 0,806). Az NA a  $c_{\text{season}}$  tényezőt 1-re vette fel. A fentieknek megfelelően az NA-ban Magyarországra megadott szélsebesség alapértéke  $v_b = 20$  m/s.

Az Eurocode az átlagos szélsebesség magasság szerinti változására a

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (15.3)$$

összefüggést adja. Az összefüggésben a  $c_r(z)$  érdességi tényező:

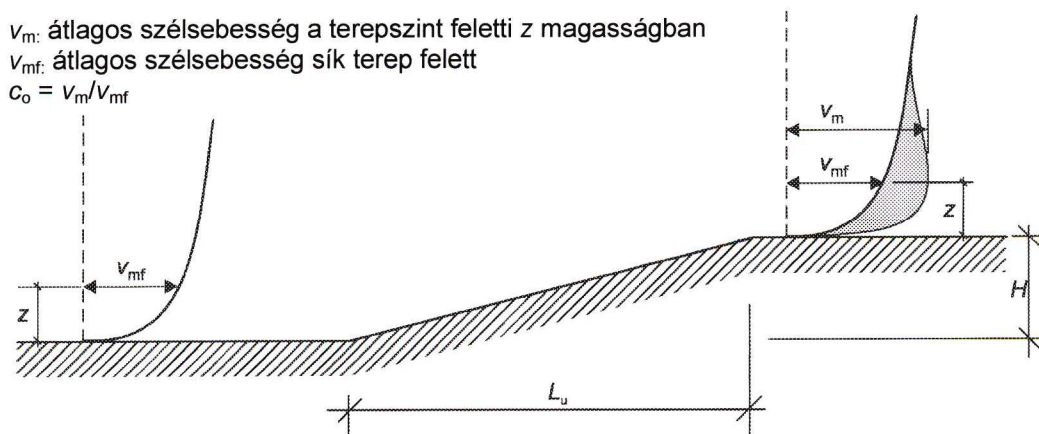
$$c_r(z) = k_r \cdot \ln(z/z_0) \quad \text{ha} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max},$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{ha} \quad z < z_{\min}. \quad (15.4)$$

Ha az építmény 200 m-nél magasabb, akkor az Eurocode szerint külön vizsgálatra van szükség, ezért  $z_{\max} = 200$  m. A  $z_0$  érdességi hosszát és a  $z_{\min}$  legkisebb magasságot az Eurocode egy táblázatban az öt beépítettségi osztályra megadja, míg a  $k_r$  beépítettségi tényező

$$k_r = 0.19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}, \quad (15.5)$$

ahol  $z_{0,II}$  a II-es beépítettségi osztályhoz tartozó  $z_0$ . A  $c_r(z)$  érdességi tényezőnek mind az öt esetben van egy konstans kezdeti szakasza, amely a kategóriától függően 1 és 10 m magasság között változik. A (15.3)-as összefüggésben szereplő, a sebességet növelő  $c_o(z)$  domborzati tényezővel azt vesszük figyelembe, hogy a dombvidéki és hegyvidéki környéktől eltérő területeken az átlagos szélsebesség a különálló dombok és meredek völgyek felett megnövekszik (15.8-as ábra). A tényező számítására az Eurocode összefüggéseket ajánl.



15.8. ábra. Dombok sebességnövelő hatása

Az Eurocode tárgyalja azt az esetet is, amikor az épületek közül valamelyiknek a magassága az öt körülvevő épületek magasságának több mint kétszerese. Ebben az esetben a magas építmény legnagyobb szélességi mérete és az épület magasságának arányától függően meghatároz egy sugarat, amelyhez viszonyított helyzetüktől (és az alacsony épület magasságától) függően számítható az a magasság, amelynek megfelelő szélesebséggel kell számolni az alacsony épületeknél.

Az Eurocode vizsgálja azt az esetet is, ha a IV-es beépítettségi osztálynál az építmények közel vannak egymáshoz. Ekkor - ha egy építmény az átlagos magasság hatszorosánál közelebb van a szomszédos épülethez - megemeli azt a szintet, ahonnan a szélhatást számolni kell. A fenti hatások számítására vonatkozó összefüggések az Eurocode-ban megtalálhatók.

### 15.1.2. A szél torlónyomásának számítása

A szélesebség ismeretében számítható az áramló levegő megállítása esetén bekövetkező nyomásnövekedés, azaz az áramlásba behelyezett szilárd testen kialakuló torlópontban (ahol a sebesség zérus) lévő nyomás és a zavartalan áramlásban lévő nyomás különbsége. Ha csak az átlagos szélesebséggel számolunk, akkor a magasság szerint növekvő torlónyomást kapunk.

A korábbi MSZ a 100 m-nél nem magasabb - nyitott térségben álló - építményeknél a torlónyomás magasság szerinti változására a (15.6) alatti összefüggést adta meg:

$$w(z) = 0,7 \left( \frac{h}{10} \right)^{0,32} [\text{kN/m}^2]. \quad (15.6)$$

Más képlet vonatkozik arra az esetre, ha a terület 10-nél magasabb épületekkel egyenletesen beépített.

Az Eurocode definiálja a torlónyomás alapértékét, amely az  $1 \text{ m}^3$  térfogatú levegő mozgási energiája:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 [\text{N/m}^2]. \quad (15.7)$$

A (15.7)-es összefüggésben  $\rho$  a levegő sűrűsége, amely a légnyomástól és a levegő hőmérsékletétől függően változik. (Az Eurocode  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  sűrűséggel számol).

Ugyanakkor az Eurocode a magasság szerint változó nyomás meghatározásánál már együtt kezeli az átlagos szélesebség és a rövid idejű szellőkések hatását. Amint láttuk a szél sebessége az átlagos szélesebség körül ingadozik. A szélesebség ingadozás (turbulencia, örvénylés) szórásának számítására az Eurocode a szélesebség alapértékét felhasználva a

$$\sigma_v = k_T \cdot v_b \cdot k_I \quad (15.8)$$

összefüggést adja, ahol a  $k_I$  turbulencia tényező javasolt értéke 1, míg  $k_T$  a (15.5) alatti kifejezéssel számítható.

Az örvénylési intenzitás magasság szerinti változása pedig az átlagos szélesség (15.3)-as, a szórás (15.8)-as kifejezése alapján, a (15.4) felhasználásával  $z_{\max} = 200$  m magasságig:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_1}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{ha } z_{\min} \leq z \leq z_{\max},$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{ha } z < z_{\min}. \quad (15.9)$$

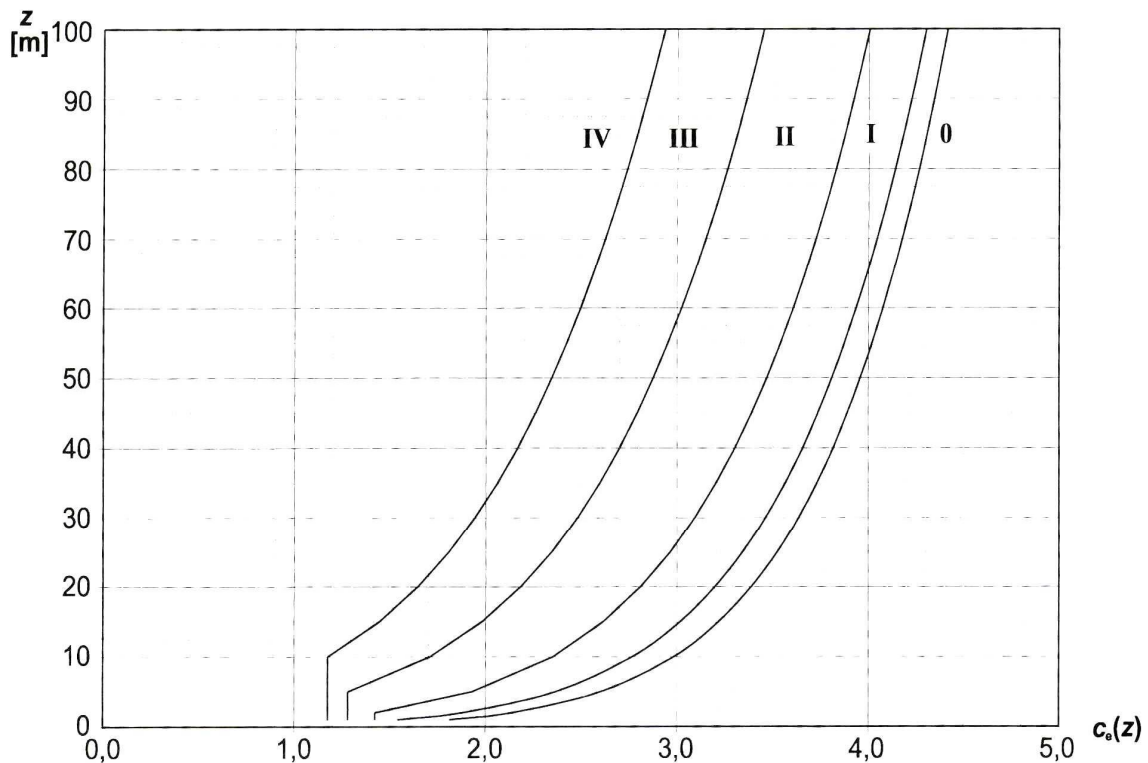
Ennek alkalmazásával a torlónyomás csúcserőteke, amelyet az átlagos szélesség és a rövid idejű széllekedések (turbulencia) okoznak:

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = c_e(z) q_b. \quad (15.10)$$

Itt  $q_b$  a torlónyomás (15.7) alatti alapértéke, míg a  $c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = [1 + 7I_v(z)] \frac{v_m^2(z)}{v_b^2(z)}$

kitettségi tényezők értékeit - 100 m-es magasságig - az öt beépítettségi osztályban, síkvidék esetén a 15.9-es ábra mutatja. Az ábrából látható, hogy az egyes beépítettségi osztályokhoz tartozó tényezők között lényeges különbsége van.

A (15.10)-es képlet az egyes magasságokban megadja az időben változó nyomás csúcserőtekeit, vagyis az adott ábrák a maximális nyomások ábrái. Ugyanakkor tudnunk kell, hogy ezek a maximumok a magasság mentén nem egy időben keletkeznek. Az Eurocode a különböző típusú szerkezeteknél - a szélterhelés meghatározásánál - más-más módon, de számol ennek hatásával, például definiál egy csökkenő tényezőt és ezzel a szélteherből számítható elmozdulásokat, valamint igénybevételeket.



15.9. ábra. Kitétségi tényezők  $c_o(z) = 1,0$  esetén a különböző beépítettségi osztályoknál



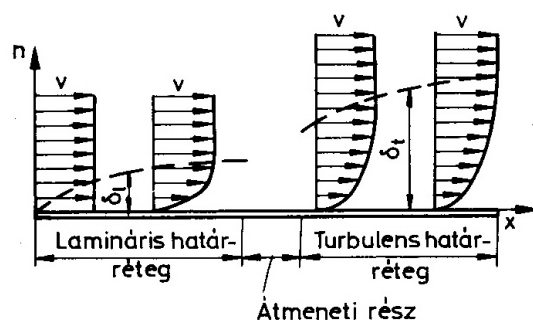
### 15.1.3. A statikus szélterhelés számítása

A levegő áramlásának sebességtere az ún. áramvonalakkal szemléltethető. Az áramvonalat minden pontjában érinti a sebességvektor.

Az áramlás lehet lamináris és turbulens. Lamináris áramlásnál a különböző sebességű szomszédos rétegek között - a molekuláris folyamatoktól eltekintve - nincsen keveredés (transzport). Az örvényekre felbomlott turbulens áramlásnál az örvények kölcsönhatása révén intenzív keveredés (impulzus, hő és anyag transzport) megy végbe.

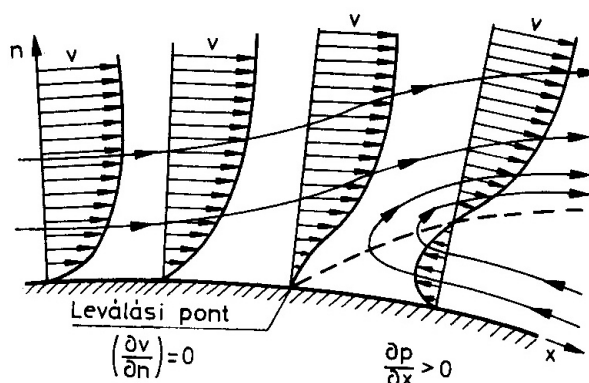
Egy test körüláramlása során a test felülete közelében ún. határréteg keletkezik [5]. A határrétegben a sebesség a felület melletti zérus értékről úgy változik, hogy a határréteg szélén elérje a külső, zavartalan áramlási sebességet.

A határréteg vastagsága a testnek az áramlás irányába eső belépőélétől kezdődően növekszik és néhány mm-től kezdve több méter is lehet, a körüláramlott épülettest nagyságától, az áramlás sebességétől és a levegő viszkozitásától függően. A 15.10-es ábrán látható, hogy a turbulens határréteg vastagabb és rohamosabban vastagszik, mint a lamináris határréteg [13].



15.10. ábra. Lamináris és turbulens határréteg

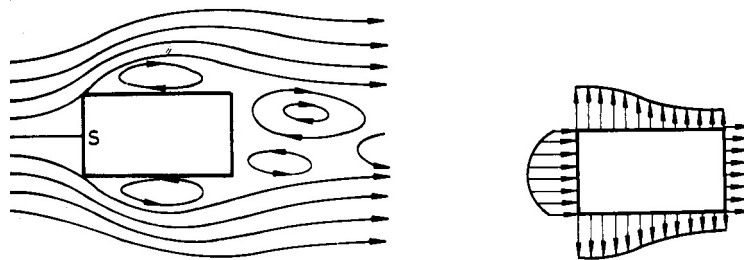
Az áramvonalak a körül áramlott test oldalánál és - bizonyos távolságon belül - a test mögött keskenyebb sávban áramlanak, mint a test előtt, így az áramlási sebesség az adott sávban megnövekszik.



15.11. ábra. Határréteg-leválás

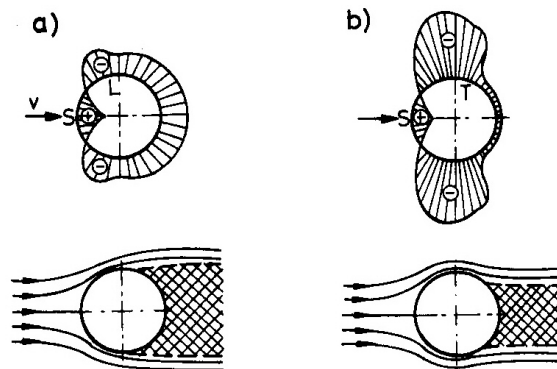
Mivel az áramló levegő egységnyi térfogatának mozgási energiája  $(\frac{1}{2} \rho v^2)$ , és az adott helyen lévő atmoszférikus nyomás összege állandó, a sebességnövekedés nyomáscsökkenéssel jár. Ugyanakkor a fal közelében előre haladó részecskék elveszíthetik mozgási energiájukat (felhasználva azt a súrlódási erők legyőzésére), és a fal mentén a test belépőélétől távolabb bekövetkező nyomásnövekedés hatására ellenkező irányú mozgás indulhat meg. Ez a jelenség a határreteg-leválás (15.11-es ábra [13]).

A 15.12-es ábrán [13] egy olyan zárt keresztmetszetet látunk, amelynél a szelvény fala nem légáteresztő. Ennek megfelelően a homlokfalon a nyomás nagyobb, az oldalfalak mentén és a hátsó falnál pedig kisebb, mint a zavartalan áramlásban lévő nyomás, azaz a homlokfalon szélnyomás, az oldalfalakon és a hátsó falon szélszívás van.



15.12. ábra. Egy síkáramlás nyomáseloszlása

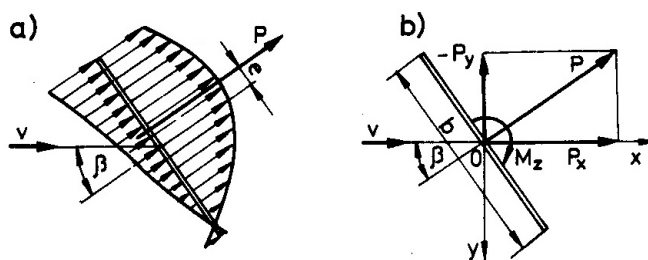
A 15.13-as ábrán [13] egy körhenger síkbeli lamináris és turbulens körüláramlását látjuk. Az ábrából látható, hogy nyomáseloszlás a kétfajta áramlás esetében különbözik.



15.13. ábra. Egy körhenger lamináris és turbulens körüláramlása

A test különböző felületrészeinél lévő nyomásnak a torlónyomáshoz való arányát a  $c_f$  erőtényezővel (alaki tényezővel) adhatjuk meg. A  $c_f$  tényezők a gyakorlatban legtöbbször előforduló alakú szerkezetek és felületek esetére a szabályzatokban, az irodalomban megtalálhatók.

A körüláramlott test nyomáseloszlása azonban csak akkor szimmetrikus, ha a szélirány a szimmetria síkba esik. A 15.14-es ábrán [13] egy olyan síklemezcsíkot látunk, amelynél a szélirány nem merőleges a lemezre. Látjuk, hogy a nyomásábrák sem szimmetrikusak.



15.14. ábra. Lemez körüláramlása

Az ábrából látható, hogy a lemez két oldalán ébredő nyomás különbségéből származó erők eredője felbontható egy szélirányú és egy a szélirányra merőleges komponensre.

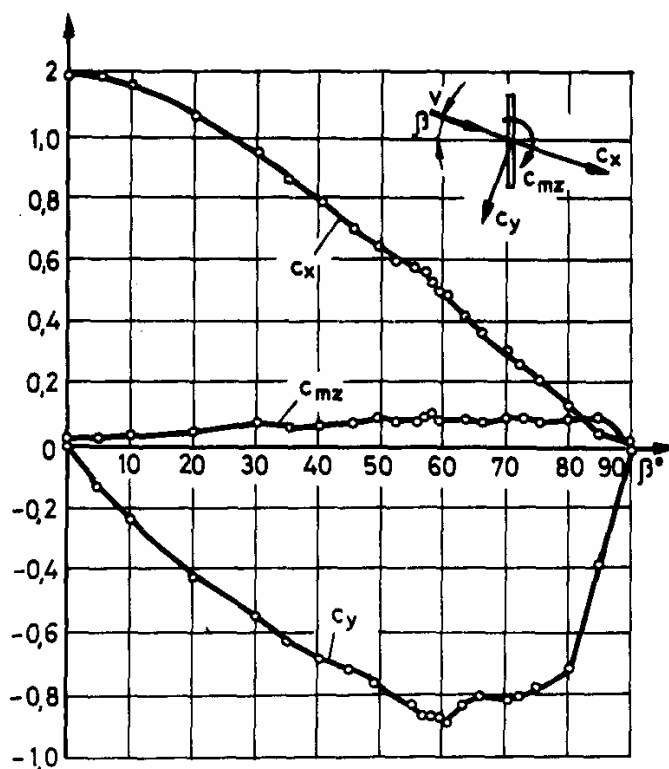
Ha a torlónyomást  $q$ -val, a lemezcsík területét  $A$ -val jelöljük, akkor a a lemezcsíkra ható erők - a korábbi időszakban használt jelölés szerinti -  $c_x$  és  $c_y$  alakú tényezők segítségével:

$$P_x = qAc_x, \quad P_y = qAc_y. \quad (15.11)$$

Az ábrából látható, hogy az eredő erő nem megy át a lemez súlypontján, ezért, ha az erőket a súlypontra redukáljuk, akkor egy erőpárt is kapunk. Ennek nagysága:

$$M_z = qAbc_{mz}. \quad (15.12)$$

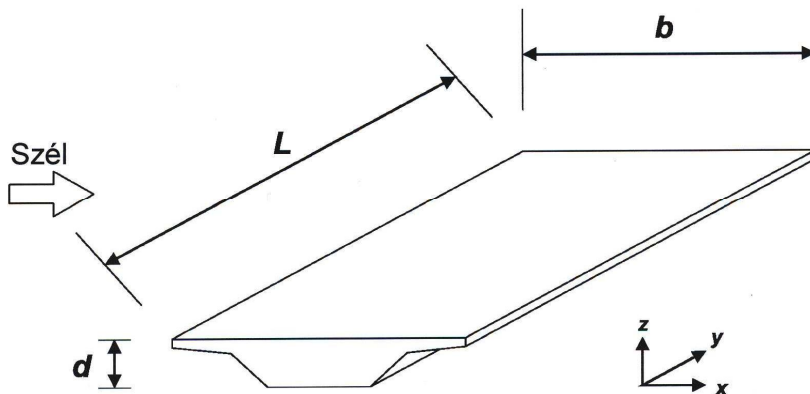
A kifejezésekben szereplő alakú tényezőknek a széliránytól való függését mutatja a 15.15-ös ábra [13].



15.15. ábra. Erőtényezők a szélirány függvényében

### 15.1.4. Hidak szélterhei

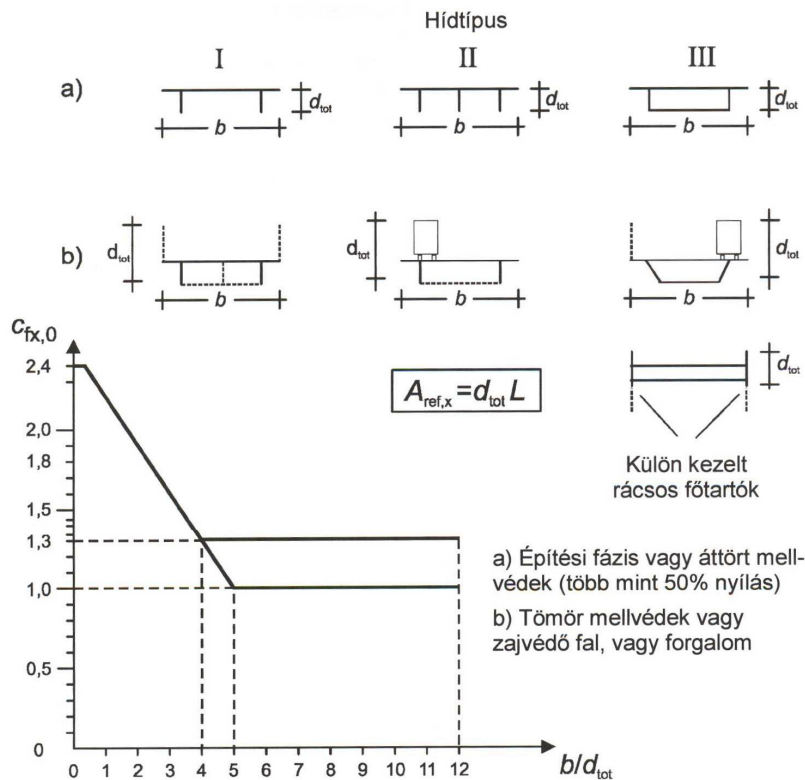
Az Eurocode kizárólag állandó szerkezeti magasságú, a szabályzatban bemutatott keresztmetszetű, egy- vagy többnyílású, egyetlen felszerkezetből álló hidakra vonatkozóan tartalmaz előírásokat, és külön tárgyalja a felszerkezetet és pilléreket érintő hatásokat. Az Eurocode a 15.16-os ábrán látható három irányban adja meg azokat az erőtenyezőket, amelyek segítségével a szélterhelés számítható.



15.16. ábra. Hidak geometriai adatai és a hidakon fellépő szélhatások irányai

#### 15.1.4.1. Az x irányú szélteher

A x irány a felszerkezet szélességével párhuzamos és a hossz tengelyre merőleges irány.

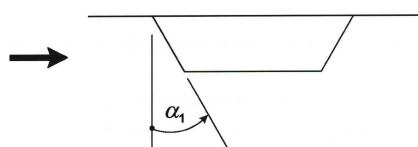


15.17. ábra. Az x irányú erőtenyező alapértéke

A szabályzat megkülönbözteti azt az esetet, amikor a hídon áthaladó forgalmat a szélhatással egyidejűnek tekintik. Az Eurocode az egyéb szerkezeteknél alkalmazott véghatás tényező nélkül számítja az erőtényezőt, tekintettel arra, hogy ebben az áramlást csak a hídszerkezet alsó és felső síkja téríti el, így

$$c_{f,x} = c_{fx,0} \cdot \quad (15.13)$$

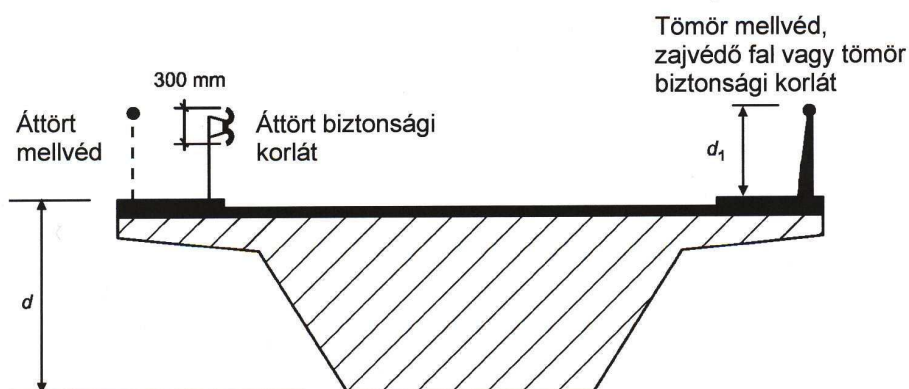
A  $c_{fx,0}$  értéke általános esetben 1,3, de abban az esetben, amikor viszonylag keskeny hídról van szó, ez az érték növekszik. A 15.17-es ábra a különböző alakú keresztmetszeteknél értelmezi a keresztmetszet magasságát, szélességét és megadja a  $c_{fx,0}$  értékét. Ez a tényező redukálható, akkor, ha a szekrénykeresztmetszet oldalfala nem függőleges (lásd 15.18-as ábra). A csökkentés fokonyként 0,5% lehet, de a redukálás nem lehet több 30%-nál.



15.18. ábra

Ha a hídfélszerkezet keresztirányú esésben van, akkor fokonyként 3%-kal (de maximum 25%-kal) növelni kell az erőtényező értékét.

A szélerő számításához ismerni kell az  $A_{ref,x}$  referenciafelületet, amely a nyílás hossza szorozva a magassággal. A terhelt felület magassága más lesz a különböző típusú (nyílt vagy zárt), a 15.19-es ábrán látható korlát esetén. A  $d$  magasság növeléséről az Eurocode rendelkezik. A szabályzat megfogalmazza a teendőket arra az esetre vonatkozóan is, amikor a hídon járművek haladnak és így növelik a terhelt felületet.



15.19. ábra. Terhelt felületek különböző típusú korlátoknál

A fentiek ismeretében az  $x$  irányú szélerő, amennyiben nincs szükség dinamikai vizsgálatra (pl. 40 m-nél kisebb fesztávolságú - a szabályzatban definiált szokásos kialakítású - közúti és vasúti hidak):

$$F_w = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} \quad (15.14)$$

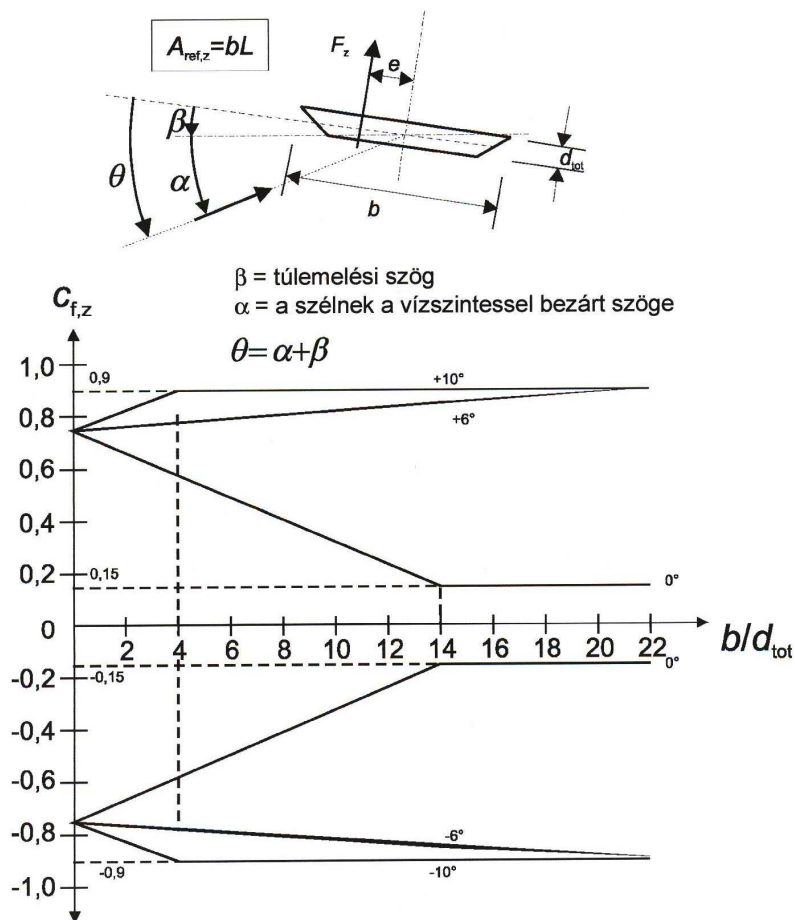
ahol  $C = c_e \cdot c_{f,x}$  ( $c_e$  a 15.9-es ábrából leolvasható tényező).

### 15.1.4.2. A z irányú szélteher

A z irány a felszerkezet síkjára merőleges irány. A mind lefelé, mind felfelé ható emelőerőt általános esetben (egyéb előírás hiányában) a 15.20-as ábrán látható  $e = \frac{b}{4}$  excentricitással kell működtetni. Látható, hogy ferde állású keresztmetszet esetén a ferdeség hatása, valamint vízszintes keresztmetszet esetén a híd keresztmetszet szélességének a keresztmetszet magasságához való aránya jelentősen befolyásolja a szélterhet.

Ugyanakkor a tényleges szerkezeteknél számolni kell a széliránynak a turbulencia miatti  $\pm 5^\circ$ -os eltéréssel, vagy a híd alatti terep - dombos vidék - lejtése miatti ferdeségével. (Az utóbbi elhanyagolható, ha pálya több mint 30 m-el van a terep felett). Mindez azt jelenti, hogy valós esetben – szélsatorna kísérletek hiányában - a  $c_{f,z}$ -nek az Eurocode által megadott  $\pm 0,9$ -es értékével kell számolni. (Az emelő erővel való számításnak akkor van jelentősége, ha intenzitása az állandó teherrel azonos nagyságrendű).

Az emelőerő a (15.14)-nek megfelelő összefüggésből számítható ( $c_{f,x}$  helyett  $c_{f,z}$ -vel számolva). A számításnál alkalmazandó referenciafelület:  $A_{ref,z} = b \cdot L$ , míg  $c_e$  megegyezik az x irányú széltehernél felvettél.



15.20. ábra. Erőtényező z irányban

### 15.1.4.3. Az y irányú szélteher

Hidaknál az y irányú (hossztengely irányú) szélterhet az Eurocode az x irányú szélteher arányában adja meg. Lemezhidak esetén ez az arány 25%, míg rácsos szerkezetű tartóknál 50%.

Amint láttuk a szabályzatban megadott híd típusnál a szélteherből számított igénybevételeket tulajdonképpen statikai számítás eredményeként kapjuk meg (eltekintve attól, hogy a  $c_e$  tényezőben benne van a szél turbulens részének hatása is). Amint már említettük az Eurocode előírásai kizárólag állandó szerkezeti magasságú, a szabályzatban megadott keresztmetszetű egy- vagy többnyílású, egyetlen felszerkezetből álló hidakra vonatkozik. Ugyanakkor látni kell, hogy a hidak nagy csoportja ezzel a módszerrel nem vizsgálható, mivel az eljárás egyáltalán nem számol a szerkezet és a szél dinamikai kölcsönhatásával. Az Eurocode felsorolása szerint az ívhidak, kábelhidak, ferde kábeles hidak, íves pályájú hidak, mozgó hidak külön vizsgálatot igényelnek.

### 15.1.5. Kör keresztmetszetű tornyok szélterhei

A 15.13-as ábrán egy körhenger síkbeli lamináris és turbulens körüláramlását láttuk. Az áramlás jellegét az ún. Reynolds-szám határozza meg:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} \quad (15.15)$$

Itt  $v(z_e)$  a szélnek a  $z_e$  magasságú keresztmetszethez tartozó csúcsebessége, amelyet a

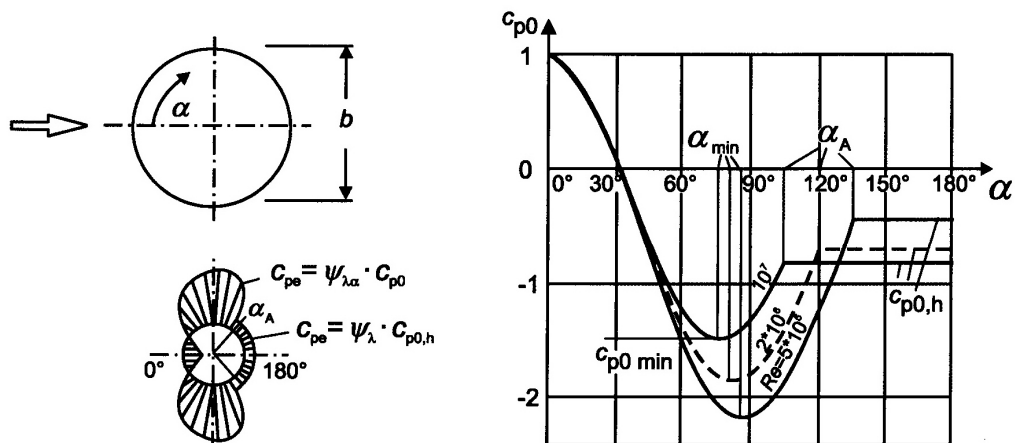
(15.10)-ben látott  $q_p(z_e)$  nyomásból a  $v(z_e) = \sqrt{\frac{2q_p(z_e)}{\rho}}$  [m/s] összefüggéssel kapunk

meg,  $b$  a henger átmérője [m],  $\nu$  a levegő kinematikai viszkozitása ( $15 \cdot 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s]).

A szélterhelésnél megkülönböztetjük a felületi terhelést és a toronynak - mint szerkezetnek - a terheit. A felületi terhekre akkor lehet szükségünk, ha pl. egy kémény burkoló elemeit, azok kapcsolatait kívánjuk méretezni. A felületi terhekből számíthatók a gyűrűirányú igénybevételek is. A felületi terhek nyomástényezője:

$$c_{pe} = c_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha} \quad (15.16)$$

A  $c_{p,0}$ -nak az Eurocode által megadott - különböző Reynolds-számhoz tartozó - függvényei a 15.21-es ábrán láthatók (a függvények ábrán jelölt jellemző értékeit az Eurocode-ban egy táblázatban megtaláljuk), míg a  $\psi_{\lambda\alpha}$  tényező számítására a szabályzat formulákat ad, amelyekben szereplő  $\psi_{\lambda}$  a véges értékű  $\lambda$  karcsúsági arányhoz tartozó csökkentőtényező. A  $\lambda$  hatékony karcsúságra az Eurocode a szerkezet geometriájától függő formulákat ad. Például az 50 méternél magasabb tornyoknál  $\lambda = 0,7 \frac{h}{b}$ , de legfeljebb 70 ( $h$  a torony magassága).

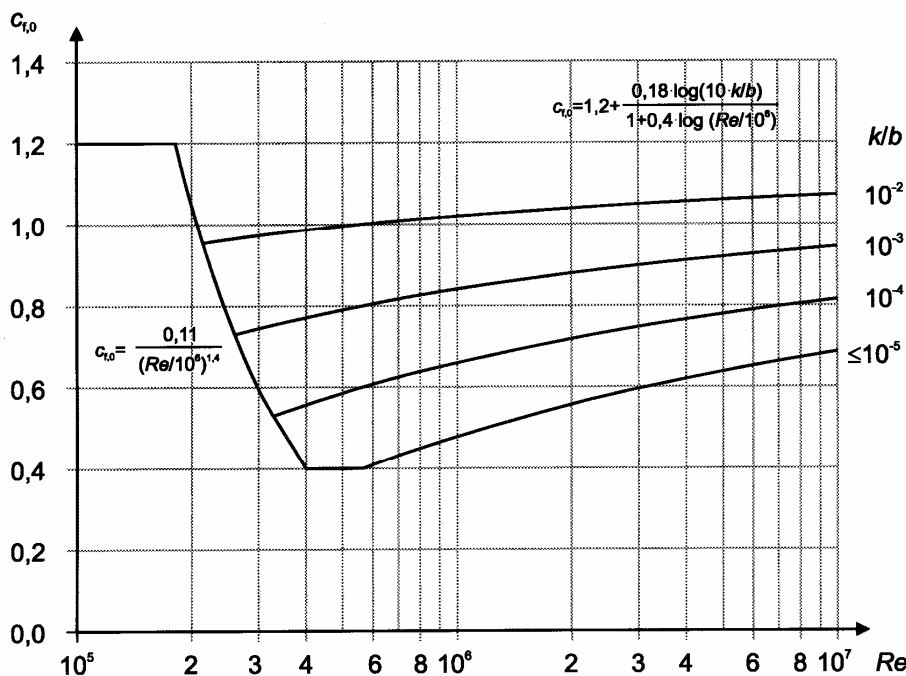


15.21. ábra. Nyomáseloszlás végtelen  $\lambda$  karcsúsági arányú körhengerek körül

A torony szélterhelésének erőtényezője:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (15.17)$$

A  $\lambda$  ismeretében a  $\psi_\lambda$  tényező az Eurocode-ban lévő grafikonról leolvasható (pl.  $\lambda = 20$  esetén  $\psi_\lambda = 0,78$ ). A  $c_{f,0}$  - amely egy végtelen hosszúságú rúd erőtényezője - függ a Reynolds-számtól és a  $\frac{k}{b}$  felületi érdességtől (15.22. ábra).



15.22. ábra. Kör keresztmetszetű henger  $c_{f,0}$  erőtényezője a  $k/b$  függvényében

A mindig jelenlévő felületi érdességre az Eurocode adatokkal szolgál. (Pl. üvegfelületnél  $k = 0,0015$  mm, sima betonfelületnél  $k = 0,2$  mm, érdes betonfelületnél  $k = 1,0$  mm, míg egy téglakéménynél  $k = 3,0$  mm).



A Reynolds-számnak három fontos tartománya van. A kritikuson aluli tartományban a körhenger körüláramlásakor a határréteg lamináris. A 15.13/a ábrán - az L ponton - egy jól definiált frekvenciával örvényleválás következik be, a szélárnyékos oldalon egy széles zavart sáv (áramlási nyom) keletkezik. Ehhez az állapothoz tartozik a legnagyobb szélirányú ellenállás ( $c_{f,0} = 1,2$ ).

Ha nő a Reynolds-szám, akkor a kritikus (átváltási) tartományban a henger homlokfalán a lamináris határréteg turbulensbe vált át és a leválási pont a szélárnyékos oldal felé - a 15.13/b ábrán látható T pontig - tolódik el, az áramlási nyom keskenyebb lesz, az örvényleválás intenzitása jelentősen csökken. A szélirányú ellenállás a 15.22-es ábrán láthatóan fokozatosan csökken a legkisebb - az ábra szerint egy sima felülethez tartozó -  $c_{f,0} = 0,4$  értékre.

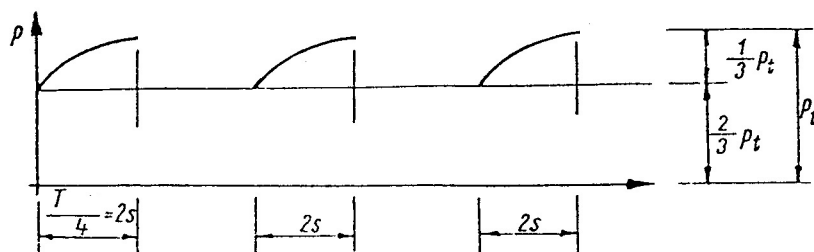
A tovább növekvő Reynolds-szám esetén a leválási pont kissé visszafele tolódik, és fokozatosan növekszik a szélirányú ellenállás, amely sima felület esetén  $c_{f,0} = 0,7$  körüli érték lesz. Az ezt követő szakaszban - a kritikuson túli tartományban - az áramlás turbulens marad, az örvényleválás ismét periodikus lesz. (Feltéve, hogy az adott Reynolds-számhoz még tartozik reális szélesség).

## 15.1.6. Dinamikai számítások szélirányú terhelésnél

### 15.1.6.1. Számítás egyszerűsített szélfüggvény esetén

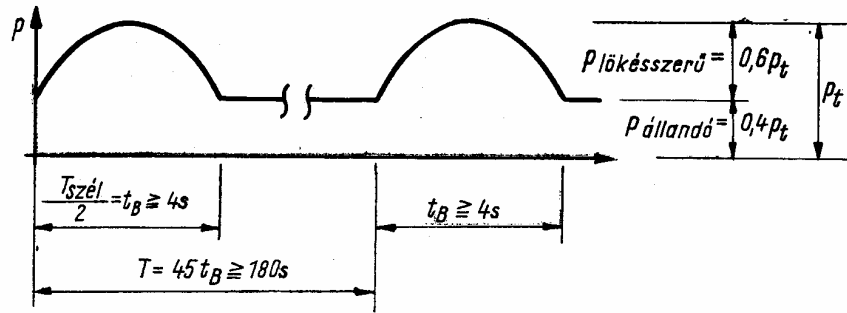
A szerkezet dinamikai vizsgálatánál az egyik - korábbiakban alkalmazott - eljárás az ún. determinisztikus módszer. Ennél a terhet statikus és dinamikus részre szokás bontani. A determinisztikus szélterhelésre több különböző időbeni lefutású tehereloszlás is található az irodalomban.

A Rausch féle tehereloszlást láthatjuk a 15.23-as ábrán, ahol a teher kétharmada állandó, egyharmada negyed szinusz hullám szerint változó [6]. A szinusz hullámból leolvasható a dinamikus szélnyomás felvett  $T$  rezgésideje, amely 8 s. A széllelkéseknél fel lehet tételezni a legkedvezőtlenebb esetet, amikor három lökéshullám a szerkezet sajátrezgésidejének - illetve annak egész számú többszörösének - megfelelő időközönként hat, mintegy "rezonanciahelyzetet" idézve elő.



15.23. ábra. Negyed szinusz hullámú széllelkés terhe

Schlaich feltevése szerint a szélterhelés változó része a 15.24-es ábrán látható, két fél szinusz hullám. Ha a szerkezet rezgésideje nagyobb, mint 8 s (ami egy nagyon hajlékony szerkezet esetén lehetséges), akkor a harmonikus rész rezgésideje azzal megegyezik, vagyis rezonancia helyzet van.



15.24. ábra. Fél szinusz hullámú szélökés terhe

Egy korábbi magyar szabályzat (MSZ 15021/1-71) a szélterhet

$$p(t) = p \left( 0.8 - 0.2 \cos \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (15.18)$$

egy konstans és egy harmonikus függvény összegének alakjában vette fel. Itt  $T$  a szélökések periódusideje, amelyről feltételeztük, hogy azonos a szerkezet első periódusidejével, de nem kisebb, mint 4 s. A számításokat két periódusra kell elvégezni.

Látjuk, hogy ezekben az esetekben - az időben változó rész esetén – egy néhány periódusig tartó - adott harmonikus időfüggvényű - gerjesztésről van szó. Ennek számítási módszerét - a csillapított esetben is - már tárgyaltuk, és amint láttuk a megoldásra jól használható a modálanalízis. A szerkezeti csillapítás figyelembe vétele csökkenti a dinamikus hatást, hiszen az utolsó lökéshullámot megelőző szélökések hatását jelentősen mérsékli.

### 15.1.6.2. Számítás mesterséges szélfüggvény esetén

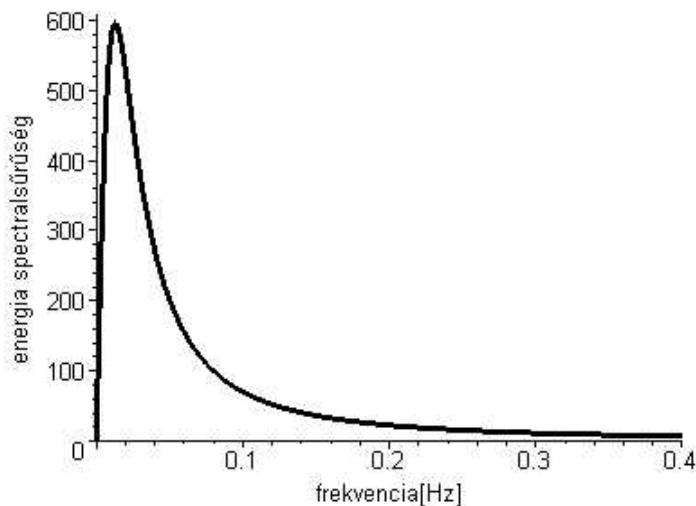
A szélesebbég lökésszerű része véletlenszerűen változik, amelyet fel lehet bontani egyes szinusz alakú folyamatokra, és meghatározható a szélesebbég változó részének  $S_v(n)$  spektruma. Az  $n$  frekvencia függvényében a spektrumra Davenport által adott összefüggés:

$$S_v(n) = \frac{4K \bar{v}_{10}^{-2} x^2}{n(1+x^2)^{4/3}}. \quad (15.19)$$

Itt  $K$  a terep felületének - Davenport által megadott és a [13]-ban megtalálható - ellenállási együtthatója,  $\bar{v}_{10}$  a 10 méteres magassághoz tartozó átlagos szélesebbég és  $x = 1200 \frac{n}{\bar{v}_{10}}$ .

Ha a spektrumot a frekvencia függvényében ábrázoljuk a 15.25-ös ábrát kapjuk. Jól látható, hogy a spektrum maximuma igen alacsony frekvenciához tartozik. Ez azt jelenti, hogy azon szerkezetek, amelyek merevsége kicsi - pl. nem kellően megfeszített sátor szerkezet - különösen érzékenyek lehetnek szél dinamikai hatására [1].

A spektrum maximumához tartozó frekvencia lényegesen különbözik a földrengés spektrumánál látottaktól, ami azt is jelent, hogy az egyik szempontból kedvező szerkezeti kialakítás a másik szempontból előnytelen lehet [2].



15.25. ábra. A szélesség energia spektruma Davenport szerint

Amint láttuk, a szélesség ingadozása függ a magasságtól is. Ezért a fluktuáció egyoldali szórásnégyzetspektruma Kaimal szerint:

$$S_v(z, n) = \frac{200u_*^2 f}{(1 + 50f)^{5/3}} \quad (15.20)$$

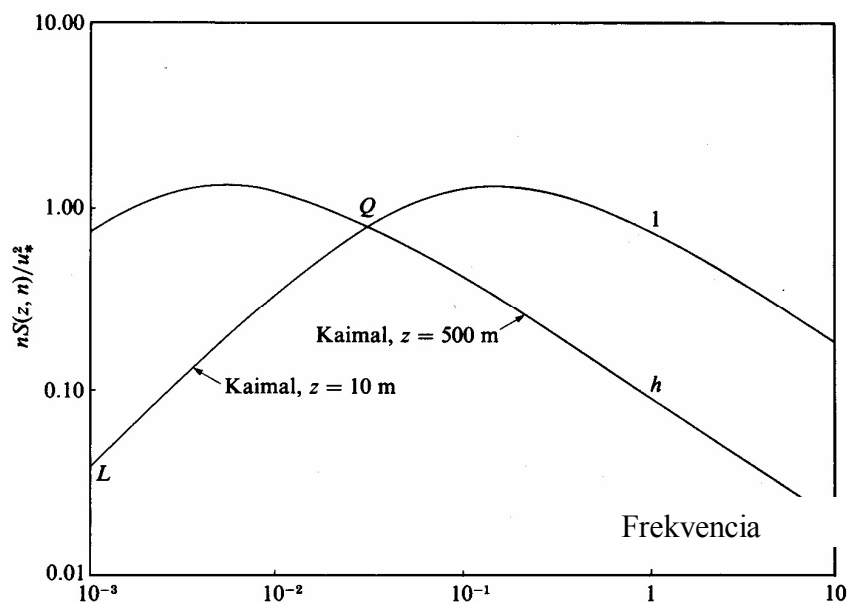
Itt  $z$  a magasság és  $n$  a frekvencia [Hz],

$$f = \frac{nz}{v(z)}, \quad (15.21)$$

$u_*$  pedig a súrlódó szélesség:

$$u_* = \frac{\bar{v}(10)}{2,5} \quad (15.22)$$

Az  $\frac{nS_v(z, n)}{u_*^2}$  függvények a különböző magasság esetén 15.26-os ábrán láthatók [4].

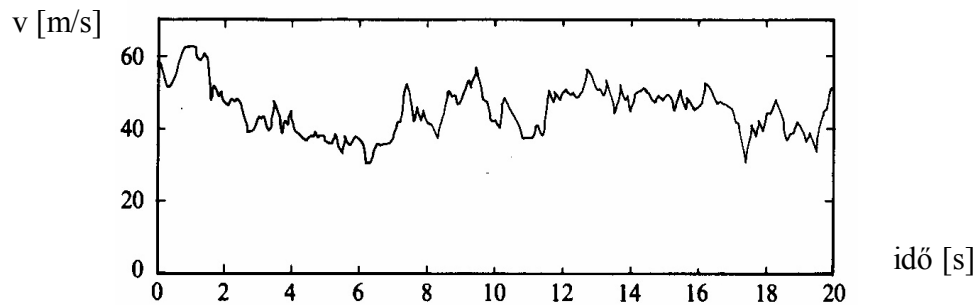


15.26. ábra. Szórásnégyzetspektrum különböző magasságokban

A Kaimal formulából a szélesség változó részének függvénye a (15.23) alatti formulával számítható [4]:

$$v(z,t) = \sqrt{2} \sum_{i=0}^N \sqrt{S_v(z, n_i)} \Delta n_i \cos(2\pi n_i t + \varphi_i), \quad \Delta n_i = \frac{n_{\max}}{N}, \quad n_i = n_0 + i \cdot \Delta n_i. \quad (15.23)$$

Itt a  $\varphi_i$  a 0 és  $2\pi$  tartományból véletlenszerűen kiválasztott fázisszög, az  $n_i$  pedig az  $i$ -edik harmonikus összetevő frekvenciája. Egy adott magasságban generált és az adott magassághoz tartozó állandó szélességgel kiegészített szélfüggvényt látunk a 15.27-es ábrán [4].



15.27. ábra. Generált szélesség

A szélesség ismeretében a szerkezetre egy általános gerjesztő erő számítható és a rezgés egyenlet megoldásának célszerű módszere a numerikus integrálás, amelyet a korábbiakban már bemutattunk.

### 15.1.6.3. Kvázi-statikai vizsgálatok

Az időben változó terhelés elvileg dinamikai számítást igényel, de jelentős dinamikus hatásra - mivel a spektrum jelentős értékei igen alacsony frekvenciákhoz tartoznak - csak karcsú építményeknél számíthatunk. A magasépítési szerkezetekre vonatkozó - a szélterhet az átlag szélességből számító - MSZ szerint dinamikai számításokat csak olyan karcsú építményeknél kellett végezni, ahol az építmény magassága meghaladja a legkisebb szélességi méret ötszörösét. A 100 méternél alacsonyabb létesítmények esetén az MSZ lehetővé tette egy egyszerűen számított dinamikus tényező alkalmazását. Ekkor a szerkezet dinamikai számítása a szerkezet  $T_1$  legnagyobb saját-rezgésidejének számítására korlátozódhat és a dinamikus tényező:

$$c_d = 1 + 0.1T_1, \quad \text{de } c_d \leq 1,4. \quad (15.24)$$

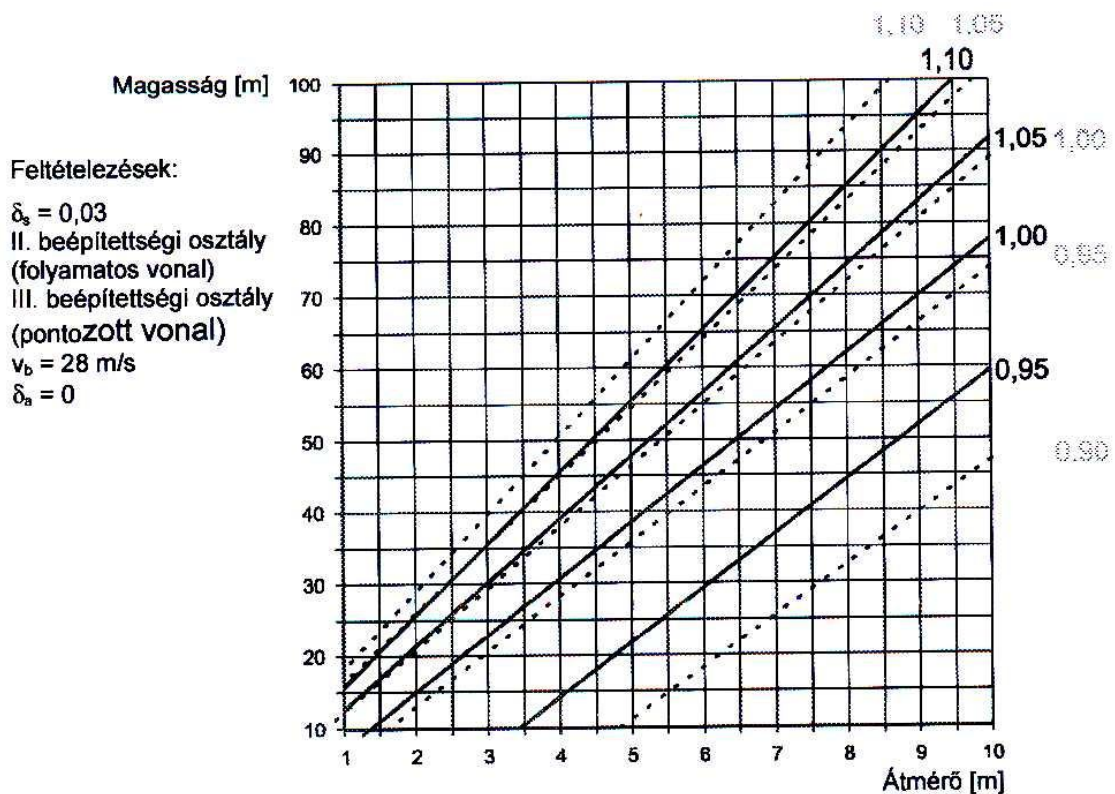
Ha a dinamikus tényező 1,4-nél nagyobbra adódott, az egyszerűsített eljárás nem volt alkalmazható, pontosabb dinamikai analízisre volt szükség.

A szélterhet a csúcshélességből számító Eurocode alkalmazása esetén - bizonyos típusú szerkezetek esetén - a nyomáseloszlás ismeretében számíthatók a szabályzatban értelmezett  $A_{\text{ref}}$  referenciafelületre ható kvázi-statisztikus erők. Az Eurocode a felületre merőleges koncentrált eredő erőt az

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{\text{ref}} \quad (15.25)$$

összefüggésből számítja. Itt  $c_f$  az erőtényező,  $q_p(z_e) = q_b \cdot c_e(z_e)$  a  $z_e$  - a szabályzatban definiált referenciamagasságban számított csúcstorlónyomás, a  $c_s c_d$  pedig a szabályzatban értelmezett szerkezeti tényező.

Annak sincs akadálya, hogy magasság szerinti vonalmentén megoszló teherrel számoljunk. Ekkor az építmény referenciaszélessége szerepel a felület helyén, míg a  $q_p(z_e)$  helyett  $q_p(z)$ -vel kell számolnunk. A (15.25)-ös kifejezésben a  $c_s c_d$  szerkezeti tényező két tényező szorzata. A  $c_s$  mérettényező azt kívánja megjeleníteni, hogy a szélsébség maximuma nem ugyanabban az időpontban keletkezik a szerkezet minden keresztmetszeténél. A  $c_d$  dinamikus tényező fejezi ki az időben változó szél és a szerkezet dinamikus kölcsönhatásából - "rezonanciájából" - keletkező dinamikus többletet. Enyhén dinamikus viselkedésű szerkezeteknél a  $c_s c_d$  szerkezeti tényezőt a szerkezet geometriai adatai függvényében - acél és vasbeton magasépületeknél, adott paramétereknél - a szabályzat grafikonokon megadja. A 15.28-as ábrán egy vasbeton kéményre vonatkozó tényezőket látunk.



15.28. ábra. A  $c_s c_d$  szerkezeti tényező belés nélküli betonkémények esetén

Az ábrából látszik, hogy a szerkezeti tényező 1-nél kisebb is lehet. Ez az oka annak, hogy az Eurocode bizonyos építményeknél (15 m-nél alacsonyabb épület, olyan falakkal merevített vázszerkezet, amely 100 m-nél alacsonyabb és a szélirányú keresztmetszeti mérete legalább negyede a magasságnak, legfeljebb 60 m magas kör keresztmetszetű kémény, amelynek átmérőjénél a magasság legfeljebb 6,5-ször nagyobb) eltekint a  $c_s c_d$  szerkezeti tényező meghatározásától, és külön vizsgálatok nélkül megengedi az 1-es értékkel végzett számításokat. Hasonló a helyzet az Eurocode vizsgálati hatáskörébe tartozó hidaknál is. Annak azonban nincs akadálya, hogy a fenti esetekben is egy bonyolultabb eljárással 1-nél kisebb értéket határozzunk meg, de a szerkezeti tényező minimális értékére a szabályzat a 0,85-ös érték alkalmazását előírja. Ugyanakkor, ha a geometriai adatokból a  $c_s c_d$  szerkezeti tényezőre a grafikonokból 1,1-nél nagyobb érték adódik, a pontosabb számítást kell végezni a szerkezeti tényezőre.

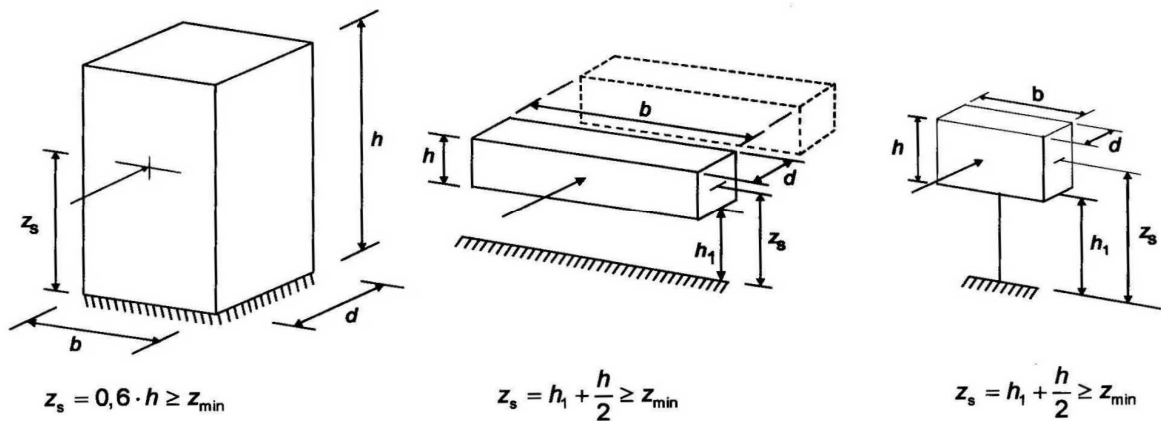
#### 15.1.6.4. Kvázi-dinamikai számítás az Eurocode-ban

Az Eurocode-ban szereplő eljárás a  $c_s$  és  $c_d$  pontosabb számítására szolgál olyan szerkezeteknél, ahol a szél dinamikai vizsgálatánál az első rezgéalakkal való számítás elegendő, és ahol az első rezgéalak ordinátái azonos előjelűek. (Pl. konzoltartó, kéttámaszú tartó, de konzolos kéttámaszú tartó már nem). Az Eurocode a  $c_s$  és  $c_d$  számítására az alábbi formulákat adja meg:

$$c_s = \frac{1 + 7I_V(z_s) \cdot \sqrt{B^2}}{1 + 7I_V(z_s)}, \quad (15.26)$$

$$c_d = \frac{1 + 2k_p I_V(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_V(z_s) \cdot \sqrt{B^2}}. \quad (15.27)$$

A képletekben szereplő - a  $c_s$  és  $c_d$  számítására szolgáló -  $z_s$  referenciamagasságok a 15.29-es ábrán láthatók egy magasépület, egy gerenda és egy jelzőtábla esetén.



15.29. ábra. Referenciamagasságok

A  $z_s$  ismeretében a (15.9)-es képletből számítható az  $I_V(z_s)$  örvénylési intenzitás. A szabályzat definiálja az  $L(z)$  örvénylési hosszát, amely a természetes szelek esetén fellépő szellőkések átlagos mértékét jelenti. A 200 m magasság alatt:

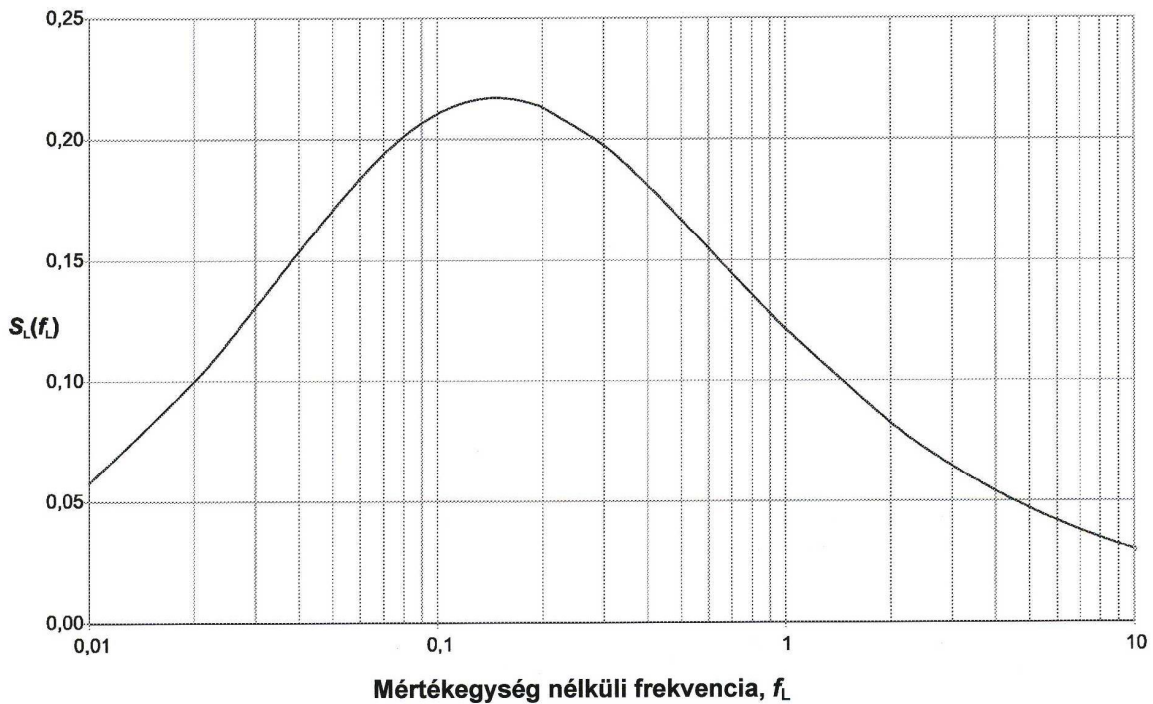
$$L(z) = L_t \cdot \left( \frac{z}{z_t} \right)^{0,67 + 0,05 \ln z_0} \quad \text{ha } z \geq z_{\min}, \quad L(z) = L(z_{\min}) \quad \text{ha } z < z_{\min}. \quad (15.28)$$

Itt  $z_{\min}$  és  $z_0$  a beépítettségi osztályokra megadott - az  $I_V(z_s)$  számításánál is alkalmazott - paraméterek. Az örvénylési referenciahossz számításához tartozó referenciamagasság  $z_t = 200\text{m}$  és az örvénylési referenciahossz  $L_t = 300\text{m}$ . Ezek után a  $B^2$  háttérválasz-tényező:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{b + h}{L(z_s)} \right)}. \quad (15.29)$$

Az  $I_v(z_s)$  és a  $B^2$  ismeretében a  $c_s$  mérettényező a (15.26)-os kifejezéssel számítható. A  $c_d$  dinamikus tényező meghatározásának első lépése a szerkezet  $n_{1,x}$  legkisebb - a szélirányú rezgéshez tartozó - frekvenciájának a számítása. A szabályzat a korábban megismert Kaimal spektrumhoz hasonló - a 15.30-as ábrán látható -  $S_L(z, n)$  mértékegység nélküli spektrális teljesítménysűrűség-függvényt használja a számítások során, amely az  $f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)}$  mértékegység nélküli frekvencia függvénye:

$$S_L(z, n) = \frac{6.8 f_L(z, n)}{(1 + 10.2 f_L(z, n))^{5/3}} \quad (15.30)$$



15.30. ábra. Az  $S_L(z, f_L)$  spektrális teljesítménysűrűség-függvény

A vizsgálat fontos adata a csillapítás logaritmusos dekrementuma (a szabályzat  $\delta$ -val jelöli), amely a szerkezeti csillapítás, az aerodinamika csillapítás és esetleges egyéb csillapító összegzett csillapítását jellemzi. A figyelembe vehető csillapításra - különböző szerkezetekre vonatkozóan - a szabályzat tartalmaz adatokat. Az  $R^2$  rezonanciaválasztényező számításához még szükség lesz az  $R_h(\eta_h)$ ,  $R_b(\eta_b)$  aerodinamikai vezetőképességi (korrelációs) függvények számítására az

$$R_l = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}), \quad \eta_h = \frac{4.6 \cdot h}{L(z_s)} f_L(z_s, n_{1,x}), \quad \eta_b = \frac{4.6 \cdot b}{L(z_s)} f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (15.31)$$

összefüggések felhasználásával. Az aerodinamikai korrelációs függvények redukálják az egy adott magassághoz tartozó spektrumértékből számított dinamikus hatást, tekintettel arra, hogy a magasság mentén változik a dinamikus szélfüggvény, és így csökken a rezonanciahatás.

A fentiek ismeretében az  $R^2$  rezonanciaválasz-tényező:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b). \quad (15.32)$$

A (15.27)-ben lévő  $k_p$  csúcstényező a szabályzatban megadott összefüggéssel szintén meghatározható:

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(vT)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(vT)}}, \text{ vagy } k_p = 3 \text{ értékek közül a nagyobb.} \quad (15.33)$$

Itt  $T$  az átlagszél számításánál használt időtartam, vagyis 600 s. A kifejezésben szereplő  $v$  túllépési frekvencia pedig:

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}}; \quad v \geq 0,08 \text{ Hz.} \quad (15.34)$$

Ezek után a (15.27)-es kifejezésből számítható lesz a  $c_d$  dinamikus tényező. A dinamikai analízis során meghatározott  $c_s$  és  $c_d$  tényezők ismeretében - a (15.25)-ös kifejezés felhasználásával - számítható az ekvivalens statikus teher, valamint - közelítőleg - a szerkezet maximális elmozdulása a hozzátartozó igénybevételekkel együtt. A szabályzatban találunk összefüggéseket a szerkezet magasság menti gyorsulásának számítására is.

Az  $S_L(z, n)$  mértékegység nélküli teljesítménysűrűség-függvény, valamint az  $R_h(\eta_h), R_b(\eta_b)$  aerodinamikusan korrelációs függvények felhasználásával számítható a korábban megismert, és a mesterséges szélfüggvény előállítására használható  $S_v(z, n)$  egyoldali szórásnégyzetspektrum is:

$$S_v(z, n) = \frac{S_L(z, n) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)}{n} \sigma_v^2. \quad (15.35)$$

Az előzőekben különálló építmények vizsgálatát tárgyaltuk. Az áramlástól körülvevő test mögött - az áramlási nyomban - nyomáshiány keletkezik. Ez a zóna jelentős nagyságú lehet. Ha ebben a szakaszban még egy további test is van, akkor az erre ható aerodinamikusan erők a lecsökkent áramlási sebesség következtében kisebbek lesznek. Az is előfordulhat, hogy a második test olyan nagy szívásba kerül, hogy az első testtel ellentétesen mozog. Vagyis a második test is befolyásolja az első testre ható erőket. Egyszerűbb esetekre vonatkozóan az ENV előszabvány az építmények egymástól való távolsága, elhelyezkedése és az épületek alakja, geometriai mérete alapján adott az elmozdulásokra (1-1,5) valamint a gyorsulásokra (1,0-3,0) vonatkozó kölcsönhatási tényezőket, amelyekkel a független szerkezetként számított elmozdulásokat és gyorsulásokat fel kell szorozni. Az Eurocode már nem tartalmazza ezeket az adatokat, viszont kritériumokat ad arra vonatkozóan, hogy mikor nem kell a kérdést vizsgálni: ha zömök az építmény ( $h/d < 4$ ), ill. a kémény ( $h/d < 6,5$ ), vagy a létesítmények közötti távolság több mint 25-szöröse a szélirányú keresztmetszeti méretnek. Ugyanakkor a szabályzat foglalkozik a sorban elhelyezkedő kör keresztmetszetű kémények kölcsönhatásával, és az erőtényező maximum 15%-os növelésével számol. Bonyolultabb elrendezés esetén részletes vizsgálatok, esetleg szélcsatorna kísérletek szükségesek.