

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības fakultāte

Būvkonstrukciju katedra

A.SPRINCE

AUGSTAS STIPRĪBAS BETONI

Rīga 2018

UDK 691.327:666.97-16

Sp 920 a

Sprince A.

Augstas stiprības betoni

Rīga: RTU, 2018. - 67 lpp.

ISBN 978-9934-505-02-7

SATURA RĀDĪTAJS

IEVADS	5
1 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU UN SEVIŠĶI AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU VĒSTURE.....	6
2 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONA UN SEVIŠĶI AUGSTAS STIPRĪBAS BETONA RAŽOŠANAS TEHNOLOĢIJAS	9
2.1 Izejmateriāli augstas stiprības betona izgatavošanai.....	9
2.2 Izejmateriāli sevišķi augstas stiprības betona izgatavošanai	13
2.3 Augstas stiprības betonu un sevišķi augstas stiprības betonu ražošanas process un apstrāde	19
3 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU UN SEVIŠĶI AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU FIZIKĀLI- MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU SALĪDZINĀJUMS.....	23
3.1 Augstas stiprības betonu fizikāli- mehāniskās īpašības	23
3.1.1 Spiedes stiprība.....	23
3.1.2 Deformācijas un elastības modulis	25
3.1.3 Šļūde	27
3.1.4 Ilgizturība	28
3.1.5 Pretestība pret ķīmiskām iedarbēm.....	28
3.1.6 Sasalšanas un atkuššanas ciklu daudzums	29
3.1.7 Uguns pretestība	29
3.2 Sevišķi augstas stiprības betonu fizikāli-mehāniskās īpašības	30
3.2.1 Spiedes stiprība.....	30
3.2.2 Deformācijas un elastības modulis	33
3.2.3 Šļūde	36
3.2.4 Pretestība pret ķīmiskām iedarbēm.....	37
3.2.5 Sasalšanas un atkuššanas ciklu daudzums	38
3.2.6 Uguns pretestība	38
4 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU PRIEKŠROCĪBAS UN TRŪKUMI.....	40
5 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU SALĪDZINĀJUMS AR PARASTIEM VIDĒJAS STIPRĪBAS BETONIEM	44
6 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU UN SEVIŠĶI AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU IZMANTOŠANAS JOMAS	47
6.1 Augstas stiprības betonu izmantošanas perspektīvas.....	50
7 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU APRĒĶINA METODIKAS BEZSIJU PĀRSEGUMIEM.....	53
7.1 Bezsiju pārsegumu aprēķina metodika pēc EN 1992-1-1	53

7.1.1	Aprēķins uz caurspiešanu	53
7.1.2	Plātnes pārbaude uz caurspiešanu.....	54
7.1.3	Stiegrojuma pret caurspiešanu nepieciešamība	55
7.1.4	Nepieciešamā stiegrojuma daudzuma un kontroles perimetra noteikšana	56
7.2	Bezsiju pārsegumu aprēķina metodika pēc SIA 262:2003	58
7.2.1	Aprēķins uz caurspiešanu	58
7.2.2	Nepieciešamā stiegrojuma daudzuma noteikšana	59
7.3	Bezsiju pārsegumu aprēķina metodika pēc ACI 318-08.....	60
7.3.1	Aprēķins uz caurspiešanu	60
7.3.2	Nepieciešamā stiegrojuma daudzuma noteikšana	62

IEVADS

Mūsdienās būvmateriālu industrija strauji attīstās, dominē tendence augstas stiprības materiālu izmantošanai, īpaši tas attiecas uz betonu. Pateicoties aktīvai pētnieciskai darbībai un praktiskai pieredzei darbā ar cementa bāzes materiāliem, ir kļuvis iespējams iegūt betonu, kas pēc stiprības rādītājiem ir spējīgs konkurēt ar tēraudu.

Augstas stiprības betons (High Strength Concrete) izskatās kā parastas stiprības betons, bet atšķiras ar tā ar augstāko makro- un mikrostruktūras blīvumu, paaugstināto ilgizturību, izturību pret koroziju, augstu gāzes- un ūdensnecaurlaidību, spēju pretoties ķīmiskām un citām agresīvām iedarbēm. Augstas stiprības betonam ir daudz priekšrocību salīdzinājumā ar tradicionālo parastas stiprības betonu. Tas ļauj samazināt materiāla patēriņu, kā arī konstrukciju kopējo svaru, iegūt būvelementu efektīvāko šķērsriezumu un projektēt graciozākas un filigrānas konstrukcijas.

Sevišķi augstas stiprības betonu (Ultra High Performance Concrete), var uzskatīt par nākotnes materiālu. Neskatoties uz savām priekšrocībām, materiāls nav tik populārs un nav aktīvi pielietojams būvniecībā, pirmkārt, sakarā ar tā augsto cenu. Vēl viens augstas stiprības betonu trūkums ir paaugstināts trauslums un rukums. Tādas betona īpašības nav līdz galam izpētītas, kā arī nav izveidoti būvnormatīvi konstrukciju no UHPC aprēķinam. Tas arī apgrūtina projektu realizēšanu no sevišķi augstas stiprības betona.

Konstrukciju aprēķinu no augstas stiprības betoniem šobrīd ir iespējams veikt pēc dažādām normām, tajā skaitā EN 1992-1-1, SIA 262:2003, ACI 318-08.

1 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU UN SEVIŠĶI AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU VĒSTURE

Tieksme iegūt betonu ar augstāku stiprību pastāv būvzinātnē no tās dibināšanas momenta. Kopš XX. gadsimta sākuma inženieri un tehnoloģi cenšas iegūt betonu ar lielāko stiprību; ar katru veiksmīgo betona stiprības palielinājumu termins „augstas stiprības betons” tiek pārskatīts. Pirmo reizi termins „augstas stiprības betons” bija izmantots 1929.gadā ASV. Augstceltņu būvniecībai bija pētīti jaunie betonu sastāvi un laboratorijas apstākļos jau 30.gadu sākumā bija iegūti betoni ar spiedes stiprību līdz 130 MPa. Eiropā, sevišķi Vācijas Federatīvā Republika (VFR), pirmie augstas stiprības betoni bija iegūti laboratorijas apstākļos 40.gados. Līdz 1966 g. betona stiprību līdz 140 MPa bija iespējams iegūt tikai laboratorijās, bet jau 1988.g. bija producētas caurules no betona markas B85 [29]. 1984.gadā American Concrete Institute (ACI) definēja augstas stiprības betonus, kā betonus ar spiedes stiprību vairāk par 6000psi vai 41 MPa. [3]

Pašus pirmos augstas stiprības betonus ieguva, pielietojot cietus maisījumus un īpašus blīvējuma veidus. Bija noteikts, kā visvājākais betona elements ir cementa akmens, kura stiprība ir tieši atkarīga no ūdens-cementa (\bar{U}/C) attiecības. Tāpēc bija loģiski samazināt \bar{U}/C attiecību līdz iespējamam līmenim. Pie $\bar{U}/C=0.4$ var uzskatīt, ka viss ūdens būs iekļauts cementa hidrotācijas reakcijā, kas novērš kapilāru veidošanu cementa akmenī. Pie vēl zemākas \bar{U}/C attiecības cements, kas nav iekļauts reakcijā („lieks” cements), kalpo par mikrograudu pildvielu, kas vēl vairāk paaugstina betona stiprību. Tomēr tādu pussauso maisījumu nav iespējams apstrādāt būvlaukumā, tāpēc ir nepieciešams pieliet klāt „lieko” ūdeni [29].

Divi noteicoši faktori 70.gados izmainīja betona pielietojumu būvniecībā. Pirmkārt, tas ir japāņu un VFR zinātnieku atklājums, ka organisko savienojumu piedeva uz naftalīnformaldeģīda un melaminformaldeģīda bāzes uzlabo betona iestrādājamību. Otrkārt, bija atklāti silīcija dioksīda putekļi (microsilica), kurus izmantoja kā betona piedevi. Microsilīcijas putekļi ar izmēru 30-100 reizes mazāko par cementa graudu izmēriem aizpilda tukšumus starp cementa graudiem. Līdz ar to ir sasniedzams cementa akmens un kontaktzonas augsts blīvums. Silīcija dioksīda putekļi reaģē ar kalcija oksīdu, kuram ir neliela mehāniska stiprība. Reakcijas gaitā iegūtas kalcijasilikathidrāti vēl vairāk palielināja cementa akmens stiprību [29]. Nesen bija atklāti jaunie efektīvi sintētiski plastifikatori. Bez silīcija dioksīda putekļiem plaši izmanto vieglus pelnus un domnas sārņus.

Šodien par augstas stiprības betoniem sauc blīvus betonus ar stiprības klasi vairāk par C55, kuru spiedes stiprība ir no 55 līdz 120 MPa (spiedes stiprība betona cilindram ar augstumu 300mm un Ø 150 mm pēc 28 diennaktīm.). Vācijā un Eiropā izstrādāti standarti betoniem ar stiprības klasi C100, pēdējā būvnormatīva EN 206-1 redakcijā tabula ar betona normatīvo klašu apzīmējumiem ir pagarināta līdz klasei C100/115. Augstas stiprības betoniem ar vieglu pildījumu pēc Eiropas normām ir apzīmējumi LC55 un LC80. [37]

Sevišķi augstas stiprības betons ir rupjgraudu vai sīkgraudu betons ar blīvu struktūru. Spiedes stiprība tādām betonam ir lielāka par augstas stiprības betonu spiedes stiprību; atkarībā no sastāva un ražošanas procesa tā sasniedz no 150 līdz 250MPa. Šobrīd Eiropā neeksistē normas sevišķi augstas stiprības betoniem. Lai izmantotu tādu betonu, ir nepieciešams būvuzraudzības apstiprinājums. No sevišķi augstas stiprības betoniem jau ir realizēti daži projekti. Iegūtas zināšanas ir apkopotas franču direktīvā par elementu no sevišķi augstas stiprības betona aprēķiniem. Tapāt arī Japānā 2004.gadā bija sastādīta līdzīga direktīva. Betona Starptautiskās Federācijas (Federation International de Beton) komitēja šobrīd strādā pie materiālu izmantošanas un aprēķina noteikumiem sevišķi augstas stiprības betoniem. Tas būs pirmais starptautiskais apkopojums, kas raksturo zināšanas līmeni par sevišķi augstas stiprības betoniem, sākot no ražošanas procesa un apstrādes līdz projektēšanai un konstrukciju aprēķiniem [16].

Tāds betons ļauj izstrādāt konstrukcijas un būves ar augstu nestspēju, kā arī ilgzturību. Sevišķi augstas stiprības betonu tehnoloģija pamatojas uz blīvuma palielināšanu ar ļoti sīkiem, pulverveida reaktīviem vai inertiem piemaisījumiem. Ar superplastifikatoru izmantošanu, kuri uzlabo betona iestrādājamību, kļūva iespējams samazināt Ū/C attiecību līdz 0.2. Pie tādas zemas Ū/C attiecības vērtības cementa akmens stiprība ir augstāka par vairākām pildvielām. Materiāla īpašības var uzlabot, piem., ar kārsto apstrādi, vai izmantojot tērauda vai cita materiāla šķiedras. Attēlā 1.1. ir aprakstīti pasākumi, kas uzlabo betona stiprību [25]:

Parastas stiprības betons: $\bar{U}/C \geq 0.45$; max $f_{ck28} \approx 60$ MPa
↓
Plastifikatoru atklāšana un izmantošana: $\bar{U}/C < 0.45$; max $f_{ck28} \approx 80$ MPa
↓
Mikrosilīcija (Microsilica) piedevas izmantošana: max $f_{ck28} \approx 150$ MPa
↓
Stieples šķiedru izmantošana (4% no apjoma): max $f_{ck28} \approx 180$ MPa
↓
Karsta apstrāde pie temperatūras no 90 °C : max $f_{ck28} \approx 220$ MPa vai pie temperatūras no 250 °C: max $f_{ck28} \approx 330$ MPa
↓

att.1.1 Pasākumu hronoloģija betona stiprības uzlabošanai [25]

Pirmās nodarbošanās ar sevišķi augstas stiprības betonu bija iesāktas 70.gados ASV. Šajā laikā bija izveidotas cementa līmes ar spiedes stiprību 440MPa. 1986.gadā Dānijā firma DENSIT patentēja sevišķi augstas stiprības betonu ar aptuvenu spiedes stiprību 200MPa. Betonu izgatavoja ar un bez tērauda šķiedrām. [14]. Pēdējos 15 gados sevišķi augstas stiprības betons ar tērauda šķiedrām izplatījās Francijā.

Runājot par sevišķi augstas stiprības betonu attīstību, atzīmē divus materiālus. Pirmais ir sevišķi augstas stiprības betons ar lielāko graudu izmēru no 6 līdz 8 mm, kuram lielāka graudu daļa sastāv no augstas stiprības apdedzināta boksīta. Produktu izstrādāja firma *Eifagge* un tās nosaukums ir BSI (Beton Special Industriel) [16]. Otrais ir tā saucamais smalkgraudu sevišķi augstas stiprības betons DUCTAL vai BPR. Materiāls ir firmas *Bouygues* produkts, kuram lielākais grauda izmērs ir mazāk par 0.60 mm. BPR šodien ir visvairāk pielietojams sevišķi augstas stiprības betons ar sīkām granulām sastāvā. BPR izstrādāšanas mērķis bija pēc iespējas viendabīgāka materiāla iegūšana, lai izslēgtu saistīšanas problēmas kontaktzonā starp cementu un pildvielu un samazināt mikroplaisu veidošanās [16].

Sevišķi augstas stiprības betonus sāka pielietot tiltu būvniecībā. Materiāls atšķiras ne tikai ar savu paaugstināto stiprību, bet arī ar samēra zemāko pašsvaru, salīdzinot ar tēraudu, ko līdz sevišķi augstas stiprības betonu atklāšanai uzskatīja par vislabāk piemēroto materiālu tiltu konstrukcijām. Sevišķi augstas stiprības betons ar savām īpašībām ļauj izstrādāt vieglas un filigrānas, bet tajā pašā laikā izturīgas konstrukcijas un realizēt jaunas formas.

2 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONA UN SEVIŠĶI AUGSTAS STIPRĪBAS BETONA RAŽOŠANAS TEHNOLOĢIJAS

Ar mūsdienu tehnoloģijām ir iespējams iegūt augstas stiprības betonu. Tomēr svaiga un sacietēta betona iegūšana pēc normām prasa nopietnu zinātnisko un praktisko sagatavošanu. Vēl vairāk tas attiecas uz sevišķi augstas stiprības betona ražošanu un pielietojumu.

2.1 Izejmateriāli augstas stiprības betona izgatavošanai

Augstas stiprības betons ir veidots no rūpīgi atlasītiem augstas kvalitātes materiāliem. Tāds betons ir sajaukts, izvietots, sablīvēts un izturēts pēc augstākajiem rūpniecības standartiem. Pēdējos gados ir veikti plaši pētījumi par augstas stiprības betona sastāviem, to izgatavošanas un iestrādāšanas veidiem. Ir konstatēts, ka nelielā daudzumā pievienots mikrosilīcija pulveris kopā ar superplastifikatoriem ievērojami palielina betona stiprību un uzlabo betona plūstamību un iestrādājamību.

Ūdens

Augstas stiprības betoniem \bar{U}/C attiecībai jābūt zemākai par 0.4. Tas ļauj samazināt porainību un paaugstināt cementa akmens stiprību. Pie zemas \bar{U}/C attiecības, tātad arī pie zema ūdens satura maisījumā, betona plastiskumu reālos apstākļos var iegūt tikai ar plastifikatoru palīdzību [24].

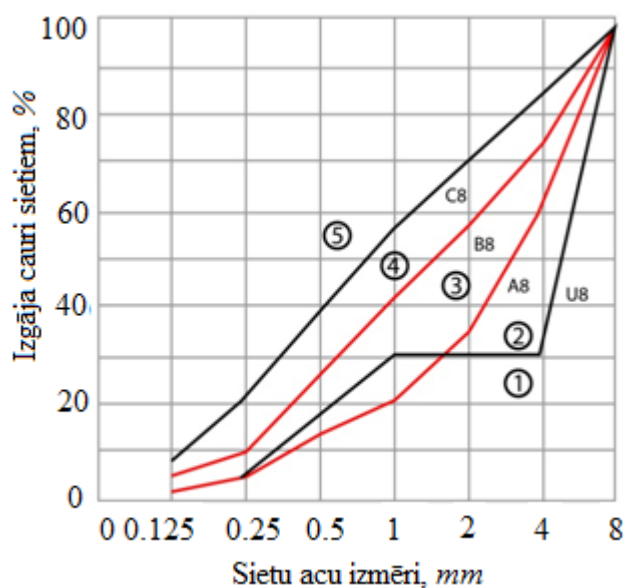
Cements

Augstas stiprības betonu iegūšanai izmanto standarta tipa cementu: CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R un CEM I 52,5 N. Kā alternatīvu izmanto arī domnas sārņus saturošo cementu: (CEM II-S, CEM III). Lai nodrošinātu betona maisījuma labu iestrādājamību, ir izdevīgi pielietot cementu ar zemu ūdens patēriņu. Cementa apjoms maisījumā sastāda no $350\text{kg}/\text{m}^3$ līdz $500\text{kg}/\text{m}^3$ [22]. Izvēloties cementu, jāpievērš uzmanība sekojošiem faktoriem:

- Cementa un plastifikatora savstarpēja iedarbība;
- Ūdens patēriņš;
- Maluma frakcijas;
- Stiprības palielinājums un vēlama gala stiprība;
- Siltuma izdalīšana hidrotācijas procesā.

Pildvielas

Augstas stiprības betoniem samazinās starpība starp pildvielas spiedes stiprību un cementa akmens spiedes stiprību, tāpēc, salīdzinājumā ar parastiem betoniem, paaugstinās pildvielu ietekme uz betona stiprības un deformācijas īpašībām. Lai garantēti iegūt spiedes stiprību lielāku par 100 Mpa, izmanto smalki sasmalcinātas pildvielas. Labi sevi parādīja bazalta(*Basalt*), diabaza(*Diabas*) un melafīla(*Melaphyl*) graudi. Sakarā ar DIN 1045-2 normām pildvielas graudu sastāvam ir jāatrodas starp A un B granulometriskām līknēm. Par izdevīgām graudu grupai $\leq 2\text{ mm}$ uzskata granulometriskas līknes, kas atrodas B līknes tuvumā un graudu grupai $>2\text{ mm}$ līknes, kas atrodas A līknes tuvumā (att.2.1) [22].



att.2.1 Granulometriskas līknes augstas stiprības betonu pildvielām [22]

Palēninātāji

Palēnina cementa ķīmisku reakciju (hidrotāciju) un cementa sacietēšanu, kā arī siltuma izstrādāšanu. Palēninātājus pielieto:

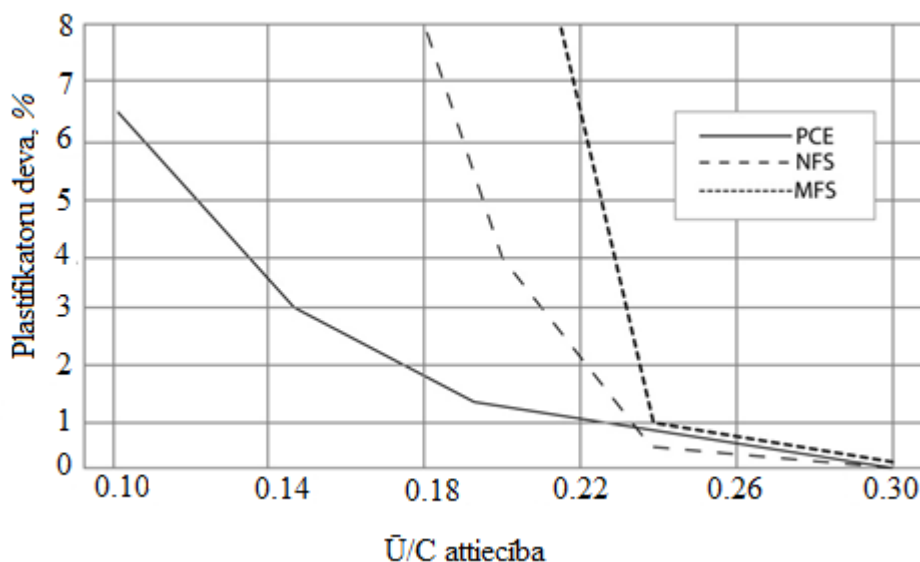
- monolītbetona lielāku elementu ražošanā, piem., tiltu būvniecībā, fundamentiem;
- transportējamam betonam;
- betondarbiem pie augstas ārējās temperatūras. [22]

Plastifikatori

Tradicionālo betonu spiedes stiprība galvenokārt ir atkarīga no cementa akmens porainības un Ū/C attiecības. Tāda betona ražošanai izmantoja tikai ūdeni, cementu un šķembas, tāpēc ilgo laiku spiedes stiprība bija ierobežota ar 50MPa. Situācija izmainījās ar plastifikatoru un šķīdinātāju izmantošanu. Galvenais efekts no plastifikatoriem ir ūdens patēriņa samazināšana un/vai betona iestrādājamības uzlabošana. Bez plastifikatoriem betona apstrāde ar zemu Ū/C attiecību nav iespējama. Plastifikatoru daudzums palielinājās ar zemāku Ū/C attiecību. Pagātnē pārsvarā izmantoja plastifikatorus uz naftalīna (SNF vai NFS), melamīna (SMF vai MFS) vai ligninsulfātu (LS) bāzes. Plastifikatoru iedarbība pamatojas uz hidralizēta cementa daļiņu un hidrotācijas produktu absorbciju [16]. Nākamais solis plastifikatoru attīstīšanā bija polikarboksilātu (polycarboxylat PCE) pielietojums. Ar tādiem plastifikatoriem ir sasniedzama augstāka ūdens ietaupīšana. Veiktie pētījumi parādīja, ka ar PCE cementa piesātinājums uzstājas pie daudz zemākas Ū/C attiecības salīdzinājumā ar plastifikatoriem uz NFS un MFS bāzes. (att.2.2) [16].

Plastifikatoru izmantošanai ir sekojoši norobežojumi:

- max. 70g/kg vai 70ml/kg cementa, ja tiek izmantots viens plastifikators;
- max. 80g/kg vai 80 ml/kg cementa, ja tiek izmantoti vairāki plastifikatori. [24]



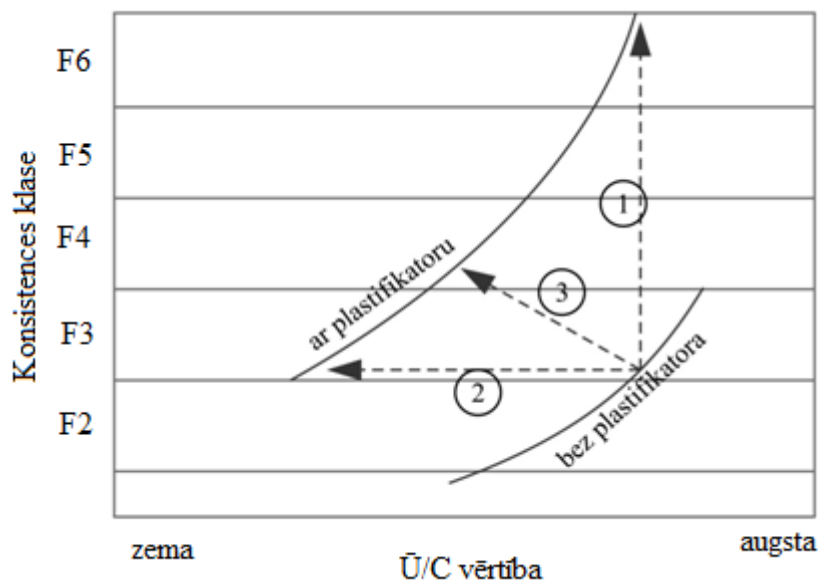
att.2.2. Ū/C attiecības atkarība no plastifikatoriem [16]

Superplastifikatori

Superplastifikatorus pielieto ūdens patēriņa samazināšanai un/vai betona iestrādājamības uzlabošanai betoniem ar konsistences klasi $\geq F4$ [22]. Eksistē 3 superplastifikatoru pielietošanas gadījumi:

1. Šķīdināšana līdz šķidra betona stāvoklim pie nemainīgas \bar{U}/C attiecības;
2. \bar{U}/C attiecības samazināšana pie nemainīgas betona konsistences;
3. \bar{U}/C attiecības samazināšana un vienlaicīga betona sašķīdināšana.

Pirmais gadījums ir pielietots filigrānu būvelementu ražošanā un būvelementiem ar horizontālo stiegrojumu, kas ievietots tuvu viens otram. Otrais gadījums uzlabo betona fizikāli-mehāniskās īpašības: ilgmūžību, stiprību. Tāpēc superplastifikatorus šajā gadījumā pielieto, lai sasniegtu augsto betona agro stiprību, (piem., ceļu remontdarbiem vai gatavo betonelementu rūpnīcās), kā arī augstas stiprības betonu ražošanai. Trešais gadījums vienlaicīgi atvieglo betonēšanas procesu un uzlabo betona kvalitāti. Tādu betonu pielieto tiltu, ceļu, hidrotehnisko būvju būvniecībā. Attēls 2.3 parāda superplastifikatoru iedarbību uz betona maisījumu. Kā redzams, ar superplastifikatoriem ir iespējams iegūt betonu ar zemāko \bar{U}/C attiecību [22].



att.2.3 Superplastifikatoru iedarbība uz betona maisījumu [22]

2.2 Izejmateriāli sevišķi augstas stiprības betona izgatavošanai

Sevišķi augstas stiprības betona ražošanai izmanto sekojošus materiālus:

- Liela un maza izmēra pildvielas(piem., šķembas, kvarca smiltis);
- Kvarca pulveris vai citu akmens sugu pulveris;
- Cements;
- Silīcija putekļi;
- Šķiedras (tērauda šķiedras, polipropilēna šķiedras u.c.);
- Plastifikatori/ Šķidrīnātāji;
- Ūdens.

Sevišķi augstas stiprības betons savā sastāvā iekļauj vairākus elementus, kurus pielieto arī augstas stiprības betonu sastāvos; betona stiprību un citas īpašības ietekmē elementu devas. Tabulā 2.1. ir salīdzināti augstas un sevišķi augstas stiprības betonu sastāvi [4].

2.1. tabula

Augstas (HPC) un sevišķi augstas (UHPC) stiprības betonu sastāvu salīdzinājums

Materiāli	UHPC daudzums (kg/m^3)	HPC daudzums (kg/m^3)
Portlandcements	708	443
Rupjās pildvielas	0	986
Smalka smiltis	1014	796.5
Silīcija pulveris	230	44.25
Kvarca pulveris	209	0
Superplastifikators	31	0
Tērauda šķiedras	155	0
Paātrinātājs	30	0
Piedeva ūdens daudzuma samazināšanai	0	6 l
Piedeva gaisa iesaistīšanai	0	0.19 l
Palēninātājs	0	0.7-0.9 l
Ūdens	108	138

Cements

DIN EN 197-1 satur 27 normatīvu cementu, kuri ir sadalīti 5 cementa grupās no CEM I līdz CEM V. Pētījumi no dažiem literatūras avotiem parāda, ka sevišķi augstas stiprības betoniem labāk ir piemērots portlandcements CEM I ar zemu C_3A saturu. Par cementa priekšrocību uzskata niecīgo ūdens patēriņu. Tāpēc sīki sasmalcinātie cementi nav ieteicami sevišķi augstas stiprības betonu ražošanai, jo tiem ir paaugstināts ūdens patēriņš. Literatūras avotos ir dots cementa malums no 3000 līdz 4500 cm^2/g un cementa stiprība no 54 līdz 64 MPa, kas atbilst cementa stiprības klasēm no 42.5 līdz 52.5 pēc DIN EN 197-1.

Sevišķi augstas stiprības betoni prasa vairāk cementa, nekā normālas un augstas stiprības betoni pie tādas pašas \bar{U}/C attiecības. Literatūras avotos var satikt datus no 600 līdz 1000 kg/m^3 . Tomēr arī ir iespējams ražot sevišķi augstas stiprības betonus ar cementa saturu zemāk par 500 kg/m^3 . Eksperimentāli bija pierādīts, ka cementa CEM III/B 42.5 NW/HS izmantošana ļauj iegūt betona stiprību pēc 28 diennaktīm vienādu ar 160 MPa. Betona paraugs bija glabāts pie temperatūras 20°C, betona sastāvam bija piemaisīti 12% silīcija putekļi un \bar{U}/C attiecība bija vienāda ar 0.2. Ja betona paraugu apstrādā vienu diennakti pie 90°C, tā stiprība paaugstinās no 180MPa līdz 215MPa. Holandē no sevišķi augstas stiprības betona ar cementu CEM III 52.2 izmantošanu bija ražoti gājēju tilta elementi caur Kaag upi [16].

Pildvielas

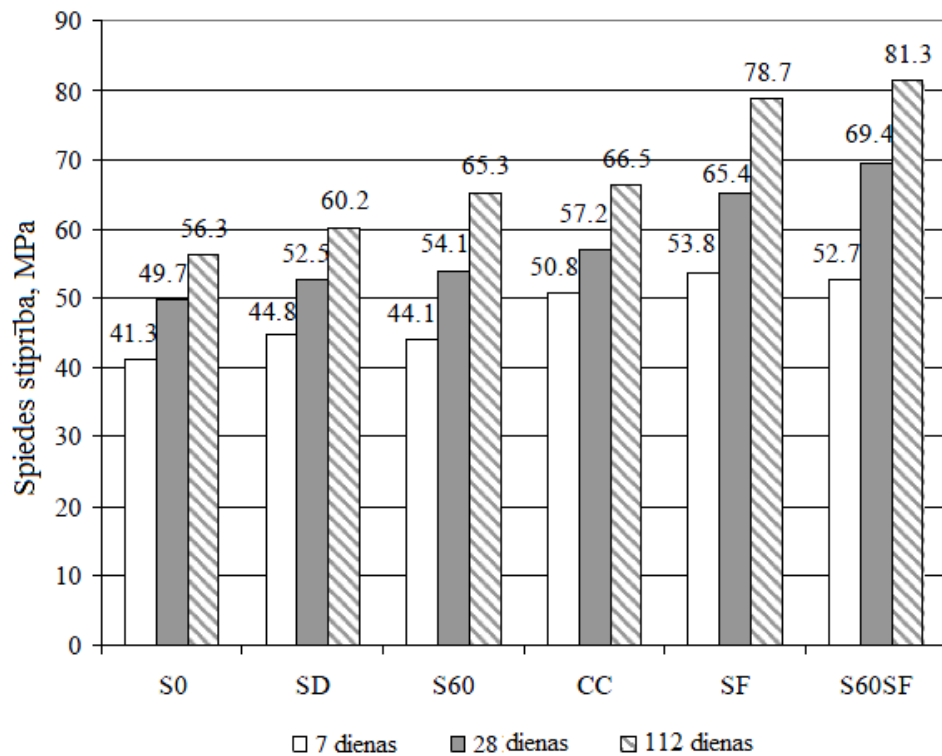
Sevišķi augstas stiprības betonus ir iespējams ražot ar pildvielu graudu izmēriem 8-16 mm, ar betona spiedes stiprību, sākot no 150MPa un vairāk. Ar betona stiprības paaugstinājumu pildvielas izvēle kļūst vēl svarīgāka, it īpaši pildvielu formas un sadalījums, mehāniskās un mineralogiskās īpašības, kā arī ķīmiski-fizikāls apmaiņas process starp cementa akmeni un pildvielām. Kā jau bija pateikts, augstas stiprības betonu galvenā atšķirība no parastas stiprības betoniem ir zema \bar{U}/C attiecība. Tāpēc lai uzlabotu betona iestrādājamību, ieteicams izmantot pildvielas ar zemu ūdens patēriņu. Sevišķi augstas stiprības betoniem parasti pielieto nesalauzītas smiltis. Pēdējie pētījumi parādīja, ka ir iespējams izmantot arī salauztas smiltis un šķembas, piem. no bazalta. Svarīgi ir izvēlēties pareizo pildvielu formu, jo neracionāli izvēlēta pildvielu forma samazina betona blīvumu un iestrādājamību [16].

Piedevas

Augstas stiprības betoniem viena no bieži pielietotām piedevām ir mikrosilīcija putekļi. No vienas puses tie uzlabo betona struktūras blīvumu, no otras puses reaģē ar cementa kalcijs hidroksīdu un veido blīvas C-S-H fāzes. Silīcija putekļu pielietojums samazina kapilāru porainību un karbonizācijas attīstību, kas arī uzlabo betona pretuguns izturību. Mikrosilīciju var izmantot kā pulverveida, tā arī suspensiju. Literatūras avotos nav viennozīmīga viedokļa par silīcija suspensijas izmantošanu. Uzskata, ka ar silīcija piedevām suspensijas veidā ir nepieciešams vairāk ūdens, lai iegūtu betona labu iestrādājamību un līdz ar to sevišķi augstas stiprības betoniem paaugstinās \bar{U}/C attiecība.

Pētījumi, kas veikti Rīgas Tehniskajā Universitātē, parādīja, ka smalki samalts dienas gaismas spuldžu stikls var aizvietot dārgo mikrosilīciju. Tāds veidots no borsilikāta stikls ir vairāk ķīmiski un termiski izturīgs salīdzinājumā ar logu stiklu. Savā sastāvā borsilikāta stikls satur apmēram 70% silīcija oksīda SiO_2 un 6-18% bora oksīda B_2O_3 . Eksperimentālie rezultāti parādīja labu pozitīvu efektu, kas dod stikla pulvera papildu samalšanu. Lai izmantotu stiklu kā aktīvo vielu betonu sastāvā, nepieciešams to sasmalcināt līdz 0.1-10 mikroniem. Augstākie spiedes stiprības rādītāji (ap 67 MPa 28 dienu vecumā un 80 MPa 112 dienu vecumā (att.2.4)) iegūti sastāvam ar mikrosilīciju (SF) un ar komplekso piedevu - mikrosilīcijs ar papildus samalto stiklu attiecībā 1:1(S60SF). Sastāviem, kas satur mikrosilīciju vai samalto stiklu, kā arī to kombinācijas, konstatēts ievērojams stiprības pieaugums ilgstošā cietēšanas periodā, kas norāda uz pucolāna reakcijām ar cementu. Veikto eksperimentu rezultātā var secināt, ka samaltais lampu borsilikāta stikls var būt izmantots kā efektīva piedeva betonam, bet to plašākai izmantošanai ir nepieciešams detalizēti izpētīt daļiņu granulometrisku sastāvu mikrolīmenī, papildu samalšanas iespējas un iegūta betona ilgmūžības īpašības.

Tāda stikla otrreizēja izmantošana ir izdevīga, jo palīdz ne tikai uzlabot betonu īpašības, bet arī atrisināt problēmu ar stikla atkritumiem. Tikai Baltijā lielākais dzīvsudraba spuldžu pārstrādes uzņēmums katru gadu savāc aptuveni 1.5 milj lampu, kas ir līdz 5 tonnām gaismas spuldžu stikla gadā. Ja betons ar borsilikāta stikla pulveri būs standartizēts un ievests būvindustrijā – tas ļaus samazināt izmaksas īpaši augstas stiprība betonu ražošanā [7].



att.2.4. Spiedes stiprības testēšanas rezultāti ar dažādo mikrosilīciju daudzumu sastāvos [7]

Šķiedras

Sevišķi augstas stiprības betonu trūkums ir paaugstināts trauslums. Lai uzlabotu betona pēclūzuma izturēšanās, pielieto tērauda, stikla, polimēra un cita veida šķiedras. Bija pārbaudīta dažādu izmēru tērauda šķiedru ietekme uz betona trauslumu. Tātad šķiedras ar garumu 13-15 mm un diametru 0.15 mm ir grūti iemaisāmi betonu sastāvā, un tie izraisa tā saucamo „adatu” efektu. Daudz labāk sevi parādīja tērauda šķiedras ar garumu no 6 mm un diametru 0.1 mm, kuras ir viegli iemaisīt sastāvā. Šķiedru izmantošana palīdz sasniegt augstu lieces-stiepes stiprību. Ir pierādīts, ka sevišķi augstas stiprības betona mehāniskās īpašības uzlabojas pie 250°C temperatūras apstrādes un ar īsu tērauda šķiedru (mazāk par 3mm) izmantošanu. Ar tādām šķiedrām laboratorijas apstākļos cilindra paraugam ar diametru 60mm ir iespējams iegūt spiedes stiprību līdz 810MPa. Attiecībai l_{ξ}/d_{max} starp šķiedras garumu l_{ξ} un pildvielas graudu lielāko diametru d_{max} jābūt vienādei apm. 10. Procentuāli ir ieteicams izmantot 2.5-3.5% tērauda šķiedru no kopējā sastāva daudzuma. Attēlos 2.5. un 2.6. var redzēt kā sabrūk sevišķi augstas stiprības betons ar un bez šķiedrām, eksperiments bija veikts Kasseles Universitātes laboratorijā [19].



att.2.5 Sevišķi augstas stiprības betona bez šķiedrām sprādzienvēda sabrukums [19]



att. 2.6 Sevišķi augstas stiprības betona cilindrs ar 2.5% šķiedru sastāvā [19]

Pētījumos bija izmantotas arī augstas stiprības poliakrīlalkohol (polyacrilalcohol) šķiedras. Tādu šķiedru izmantošana uzlabo betona plastiskumu pēc lūzuma. Lai uzlabotu betona izturēšanās lūzuma un pēc lūzuma laikā, kā arī betona ugunspretestību, ir ieteicams izmantot šķiedru piedevas 0.3-0.6% apjomā. Īpaši iedarbīgs ir maisījums no šķiedrām, piem., atšķirīgas šķiedras pēc garuma vai materiāla (tērauda jeb polyacrilnitril,-alcohol). Tabulā 2.2 ir doti dažādi šķiedru veidi un to mehāniskās īpašības [19]:

Šķiedru klasifikācija

Šķiedru vieds		Šķiedru diametrs/biezums (μm)	Šķiedru garums (mm)	Šķiedru blīvums (g/m^3)	Elastības modulis (kN/mm^2)	Stiepes stiprība (N/mm^2)	Iespējama stiepe līdz lūzumam (%)
Tērauda šķiedras	Tērauda stieple	500-1300	30-60	7.85	160-210	>1000	3-4
	Tērauda skaidas	400	26-32	7.85	210	980	-
	Tērauda loksne	400-650	15-35	7.85	210	270-800	10
Stikla šķiedras		3-30	3-25	2.68-2.7	72-75	1500-1700	1.5-2.4
Propilēna šķiedras	Glūdas	18-22	6-18	0.91	4-18	320-560	8-20
	Nelīdzena virsma	50-100	6-19	0.91	3.5-10	320-400	5-15
Poliakrilanitrila šķiedras		18-104	4-24	1.18	15-20	330-530	6-20
Ogļu šķiedras		5-10	6	1.6-2.0	150-450	2600-6300	0.4-1.6
Azbesta šķiedras		0.02-30	<40	2.6-3.4	160	1000-4500	2-3

Plastifikatori

Plastifikatoru īpašības ir aprakstītas sadaļā 3.2.

2.3 Augstas stiprības betonu un sevišķi augstas stiprības betonu ražošanas process un apstrāde

Galvenais augstas stiprības betonu ražošanas uzdevums ir pietiekama iestrādājamības nodrošināšana visā būvniecības gaitā. Priekš tam ir nepieciešami:

- Pildvielu mitruma kontrole;
- Dozējuma augsta precizitāte;
- Maisītāju izmantošana ar augstu maisīšanas intensitāti.

Lai iegūtu optimālo sastāva viendabīgumu, īpaši sastāviem ar mikroelementiem, par visizdevīgāko devas secību uzskata sekojošo:

1. pildvielas(šķembas);
2. cements;
3. ūdens;
4. vieglie pelni un silīcija putekļi.

Lai iegūtu optimālo iedarbību un gaidāmo efektu no plastifikatoriem, tos piemaisa betona sastāvā jau pēc ūdens un viegliem pelniem vai silīcija putekļiem. Maisīšanas secība un laiks jādefinē ar norādījumiem. Betona transportēšanas laikā plastifikatorus vienmērīgi sadala maisīšanas veltnī. Transportējamam betonam, īpaši uz ilgām distancēm, plastifikatorus bieži piemaisa būvvietās, lai iegūtu mīkstāko un šķidrāko betona konsistenci. Vidējais maisīšanas laiks ir 1-5 min/m³ [24]. Augstas stiprības betona ražošanas procesā maisītāji ātri kļūst netīri betona lipīgas struktūras dēļ, tāpēc var būt nepieciešama papildtīrīšana. Nav pieļaujams maisīt ar tvaika padevi. Augstas stiprības betoniem ir ieteicams izmantot augstas intensitātes maisītājus, jo pēc tam ir iespējama viegla pārsūknēšana ar pumpas palīdzību.

Pateicoties samēra zēmam cementa saturam un zēmai Ū/C attiecībai, augstas stiprības betoni pēc sacietēšanas attīsta sevī sekojošas īpašības (salīdzinājumā ar tradicionāliem betoniem):

- Ātrākais temperatūras paaugstinājums konstrukcijās;
- Paaugstināts ūdens patēriņš hidrotācijas procesā;
- Paātrināts stiprības palielinājums pirmās dienās.

Augstas stiprības betoni prasa speciālo apstrādi, tāpēc būvlaukumā ir nepieciešams būvdarbu vadītājs, kurš zina, kā rīkoties ar betoniem $\geq C30/37$. Lai izslēgtu ražošanas, iestrādājāmības un apsekošanas kļūdas, jāizstrādā kvalitātes kontroles plāns, kas sevī iekļauj:

- kontrole no ražotāja puses (prasības materiāliem, tehniskam aprīkojumam, betona maisījuma un sacietējoša betona raksturojumam, pieļaujamo parametru izstrādāšana un novirze no normām);
- kontrole no patērētāja puses;
- rīcības gadījumā, ja ir nepieļaujamas novirzes no normām;
- atbildīgo personu noteikšana. [24]

Salīdzinājumā ar parastas stiprības betoniem, betoni ar augstu stiprību ātrāk panāk stingumu, ja netiktu piemaisīti palēninātāji. Veidņu izmantošana betonēšanas darbiem ir iespējama, ja svaigs augstas stiprības betons nav lipīgs. Ar \bar{U}/C attiecības samazināšanu un silīcija putekļu daudzumu palielināšanu paaugstinās arī nepieciešamas enerģijas daudzums, kas nepieciešams sablīvēšanas procesam un gaisa izdalīšanai. Pēc vācu normām DIN 1045-3:2001[16] betona vidējais papildapstrādes un aprūpes laiks ir ierobežots ar vienu diennakti. Taču tāda īsa laika periodā augstas stiprības betona mehāniskās īpašības nebūs sasniegti. Betona aprūpe ietekmē betona kvalitāti, tāpēc svarīgi ir atcerēties par mitruma apstrādi. Betona pēcapstrāde ar ūdeni ir nepieciešama, lai izvairītos no mikroplaisām, jo betonam ir necīga \bar{U}/C attiecība. Ir ieteicams pagarināt papildapstrādes laikus līdz divām diennaktīm iekšējiem elementiem un līdz trim diennaktīm – ārējiem elementiem. Ja ir paaugstinātas necaurlaidības un ilgmūžības prasības, tad apsekošanas periodam jābūt ne mazāk par trim diennaktīm. Papildpēcapstrāde jāsāk uzreiz pēc sablīvēšanas darbu beigām.[24]

Sevišķi augstas stiprības betoniem ir iespējams izmantot tādas pašas dozēšanas un maisīšanas tehnoloģijas, kā parastas un augstas stiprības betoniem. Betonus samaisa diska vai sila veida maisītājos. Lai izvairītos no liekām porām, betonus samaisa vakuummisītājā. Betona maisīšanas procesā galvenais priekšnosacījums ir precīza smalko graudu un šķidro komponentu devas noteikšana, kā arī noteiktais maisīšanas laiks. Svarīga ir maisītāja piepildīšanās secība. No sākuma maisītāju pilda ar sausiem komponentiem (smalkgraudu un rupjgraudu pildvielas, cements, smalkas piedevas), kādu laiku sausus komponentus maisā bez šķidruma piedevas. Kad komponenti ir labi samaisīti, atļauts pievienot ūdeni un šķidras piedevas, par pēdējiem maisījumam pievieno plastifikatorus. Visi komponenti kārtīgi jāsamaisa līdz betona homogēnas struktūras iegūšanai (sevišķi, ja ir pielietotas tērauda vai cita mākslīga materiāla šķiedras). [16]

Sevišķi augstas stiprības betonus ražo kā gatavus sausus maisījumus, tā arī kā gatavus saliekamus elementus. Lai iegūtu visu komponentu vienmērīgas devas un homogēnu maisījumu, nepieciešamas precīzas iekārtas. Īpaši tas attiecās uz maisītājiem, ar kuru palīdzību iegūst sastāvus ar smalkiem graudiem, sīkām daļiņām un šķiedrām. Visi komponenti ražošanas procesā tiek glabāti atsevišķi silosos. Pulverveida silicija putekļi jāšargā no mitruma, lai izvairītos no aglomerācijas. Garas tērauda šķiedras jāizšķir pirms piemaisīšanas, lai tie maisīšanas laikā neradītu „adatas” efektu. Sevišķi augstas stiprības betonu maisīšanas laiks ir ilgāks salīdzinājumā ar parastas stiprības betonu maisīšanas laiku, parasti tas ir 10-15 min. Maisīšanas laiku var samazināt, ja betons ir samaisīts divās fāzēs, no sākuma ar lielu un pēc tam samazināto ātrumu (piem. 6m/s un 1.4m/s). Lai iegūtu labāko betona konsistenci, pārtraukuma laikam jābūt 1-2 min. [16]

Sevišķi augstas stiprības betonu izgatavošanai bija pieņemti sekojošas tehnoloģiskas prasības:

- ūdens cementa attiecības samazināšana līdz $\bar{U}/C=0.2$;
- plastifikatora un mikrosilicija dioksīda izmantošana;
- pildvielas blīvuma optimizēšana līdz pat nanoizmēriem;
- maksimālo pildvielu graudu izmēra norobežošana līdz 2mm;
- augstas stiprības pildvielu izmantošana;
- dažos gadījumos betona sacietēšana augsta spiediena (500 bar) un augstas temperatūras(250°C) apstākļos.

Sevišķi augstas stiprības betonu ir iespējams ielikt veidņos ar betona sūkni, šļūteni vai spaiņa palīdzību. Jāuzmanās, lai betons nesaņemtu lieko gaisu, sevišķi pie augsto veidņu piepildīšanas. Ja betona sastāvā ir tērauda šķiedras, nepieciešams nodrošināt betona nepārtrauktu piegādāšanu veidņos un izvairīties no betona brīvas krišanās. Šajā gadījumā ir iespējams iegūt šķiedru vienmērīgo sadalīšanās veidņos un vienmērīgo slodzes uzņemšanu. Veidņiem jābūt pietiekami bieziem, lai uzņemtu spriegumu no šķidra betona. Īpašība, kura jāievēro pie sevišķi augstas stiprības betonu apstrādes, ir betona virsmas pēcapstrāde. Lai iegūtu glūdu virsmu, iesaka lietot vibrodēli ar nelielu frekvenci. Arī šajā gadījumā pozitīva iedarbība ir atkarīga no betona apstrādes momenta. Ja betons nav pietiekami ciets, tā virsma pakāpeniski saplaisās. Šie aspekti ir vairāk svarīgi monolītbetonam, kuru ielej būvlaukumā, nevis saliekamiem betona elementiem, kurus izgatavo rūpnīcā.

Nekorekta apstrāde, piem., nepietiekama atklātas betonvirsmas aizsardzība no izžūšanas vai saules iedarbības, var kļūt par cēloni negludas, tā saucamas „ziloņādas” rašanai. (att.2.7) [16]. Efektīva metode pret virsmas izžūšanu ir pastāvīga mitruma piegādāšana vai arī virsmas hermētisks pārklājums.



att.2.7 „Ziloņādas” efekts [16]

3 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU UN SEVIŠĶI AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU FIZIKĀLI- MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU SALĪDZINĀJUMS

Betons ir kompozītmateriāls, kas sastāv no cementa pastas un pildvielām, tāpēc ir skaidrs, ka betona mehāniskās īpašības ir atkarīgas no tā divu sastāvdaļu īpašībām. Šajā nodaļā sīkāk apskatīsim augstas un sevišķi augstas stiprības betonu galvenās fizikāli-mehāniskās īpašības: spiedes stiprību, elastības moduli un deformācijas, ilgizturību, šļūdi un rukumu, kā arī veiks salīdzinājumu aprēķina vērtībām pēc dažādām normām.

3.1 Augstas stiprības betonu fizikāli- mehāniskās īpašības

3.1.1 Spiedes stiprība

Augstas stiprības betoni ātrāk par tradicionāliem sasniedz stiprību. Tas ir zemas Ū/C attiecības rezultāts, kā arī aktīvs siltuma izdalījums sakarā ar ātru hidrotāciju un augstu cementa saturu. Betonu spiedes stiprība ir atkarīga no vairākiem faktoriem, tādiem kā sastāvdaļu īpašības un proporcijas, hidrotācijas pakāpe, slodzes lielums, testēšanas metode un parauga forma. Betona stiprību ietekmē sīku un rupju pildvielu kvalitāte, cementa pastas kvalitāte, kā arī saistības kontaktzonā starp cementa pastu un pildvielām. Ir apskatāma betona makro un mikrostruktūra uz porainību, poru daudzumu un izmēriem, poru izplatība, kā arī saistības starp atsevišķiem ķermeņiem.[2]

Tabulā 3.1 ir dotas augstas stiprības betona klases un stiprības vērtības pēc EN 206-1.

3.1. tabula

Augstas stiprības betona klases un stiprības vērtības
(cilindrs(Ø150mm,augstums 300mm),kubs(malas garums 150mm))

Spiedes stiprības klase	Minimālā raksturīgā cilindra stiprība f_{ck} (N/mm ²)	Minimālā raksturīgā kuba stiprība $f_{ck,kub}$ (N/mm ²)	Vidēja cilindra spiedes stiprības f_{cm} (N/mm ²)	Vidēja stiepes stiprība f_{ctm} (N/mm ²)
C 55/67	55	67	63	4.2
C 60/75	60	75	68	4.4
C 70/85	70	85	78	4.6
C 80/95	80	95	88	4.8
C 90/105	90	105	98	5.0
C 100/115	100	115	108	5.2
			$f_{cm}=f_{ck}+8$	$f_{ctm}=2.12\ln(1+f_{cm}/$

				10)
--	--	--	--	-----

Pēc EN 1992-1-1 parastas un augstas stiprības betonu aprēķina spiedes stiprība ir definēta sekojoši:

$$f_{cd} = a_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \quad (3.1)$$

kur: γ_c betona drošuma parciālais faktors:

$$\gamma_c = 1.5;$$

a_{cc} koeficients, kurš ievērtē ilglaicīga slodzes ietekmi uz spiedes stiprību un nelabvēlīgos efektus, kas rodas no slodzes pielikšanas veida.

PIEZĪME. Valstī lietojamai a_{cc} vērtībai ir jābūt starp 0,8 un 1,0 un to var atrast tās Nacionālajā Pielikumā. Rekomendējamā vērtība ir 1. [37]

Augstas stiprības betoniem, sākot no klases C 55/67, ir rekomendēts lietot papildus drošuma koeficientu γ_c^* , tad aprēķina spiedes stiprības formula izskatīsies šādi [20]:

$$f_{cd} = a_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c \gamma_c^*}. \quad (3.2)$$

Vācu normās DIN 1045-1 koeficientu γ_c^* definē, kā :

$$\gamma_c^* = \frac{1}{1.1 - \frac{f_{ck}}{500}} \geq 1.0. \quad (3.3)$$

Tātad augstas stiprības betona C 100/115 papilddrošuma koeficients γ_c^* ir vienāds ar 1.11.

Pēc Šveices normām SIA 262:2003 parastas un augstas stiprības betonu aprēķina spiedes stiprība ir definēta sekojoši:

$$f_{cd} = \frac{\eta_{fc} f_{ck}}{\gamma_c}; \quad (3.4)$$

kur: η_{fc} – aprēķinu koeficients:

$$\eta_{fc} = \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{\frac{1}{3}}; \quad (3.5)$$

γ_c – betona drošuma parciālais faktors:

$$\gamma_c = 1.5.$$

Amerikāņu normās ACI 318-08 tāpat kā Šveices SIA 262:2003 normās betona stiprības klašu robeža nav definēta.

3.1.2 Deformācijas un elastības modulis

Elastības modulis jeb Junga modulis ir koeficients, kas raksturo materiāla pretestību stiepes vai spiedes elastīgajai deformācijai. Ir pieņemts uzskatīt elastības moduli, kā atsevišķo betona īpašību, bet īstenībā betonam, kā kompozītmateriālam, ir divi elastības moduļi – cementa pastas un pildvielu. Saskarsmes zona starp cementa pastu un pildvielām, iespējams, ir vissvarīgākais faktors, kas ietekmē augstas stiprības betonu mehāniskās īpašības. Kaut arī betons nav uzskatīts par perfekti lineāro-elastīgo materiālu, tam ir piemērots Huka likums par materiālu elastību un to izmanto aprēķinos. Elastības modulis (Junga modulis) ir viens no svarīgākajām betona mehāniskajām īpašībām un ir īpaši nozīmīgs augstbūvju aprēķiniem [2].

Palielinot pildvielu graudu izmēru vai izmantojot stiprākas pildvielas ar lielāku elastības moduli, palielinās arī betona elastības modulis. Tāpēc betona elastības modulis ir cieši saistīts ar cementa pastas un pildvielu mehāniskajām īpašībām.

Neskatoties uz to, ka betona elastības modulis uzlabojas, izmantojot stiprākas un blīvākas pildvielas, nedrīkst aizmirst par to, ka tās ir arī spējīgas radīt paaugstināto spriegumu koncentrāciju kontaktzonā, kas ir mikroplaisu un betona stiprības samazināšanas cēlonis. Elastības modulis paaugstinās ar betona stiprības palielināšanu. Tabulā 3.2. ir dotas tuvinātas elastības moduļa vērtības sastāviem ar kvarcīta piedevām pēc EN 1992-1-1. Betona elastības modulis sastāviem ar citiem piedevām var atšķirties no aprēķinātām vērtībām līdz 25 % [17].

3.2. tabula

Augstas stiprības betonu elastības moduļu vērtības

Spiedes stiprības klase	C 55/67	C 60/75	C 70/85	C 80/95	C 90/105	C 100/115
Elastības moduļa apr. vērtība E_{cm} (N/mm ²)	37800	38800	40600	42300	43800	45200

Pēc EN 1992-1-1 betona elastības moduļa tuvināto vērtību atrod pēc formulas (3.6):

$$E_{cm} = 22 \left[\left(\frac{f_{cm}}{10} \right) \right]^{0.3}; \quad (3.6)$$

kur: f_{cm} – vidēja cilindra spiedes stiprība (MPa).

Elastības moduli viegliem betoniem ar augstu stiprību definē sekojoši:

$$E_{lcm} = \frac{E_{cm}}{2200 \text{ kg/m}^3} \quad (3.7)$$

Pēc SIA 262:2003 formula (3.8.) tuvinātās elastības moduļa vērtības noteikšanai attiecas uz visām betonu klasēm, tomēr atkarībā no betonu sastāviem elastības modulis jāpārbauda eksperimentāli:

$$E_{cm} = k_E \sqrt[3]{f_{cm}}; \quad (3.8)$$

kur: k_E – koeficients, atkarīgs no izmantojamām pildvielām:

- lielas stiprības pildvielas (grants): 10000-12000
- vidējas stiprības pildvielas (kaļķi): 8000-10000
- zemas stiprības pildvielas: 6000-8000

Elastības moduli viegliem betoniem ar augstu stiprību pieņem kā elastības moduļa tuvinātās vērtības un samazinošā koeficienta reizinājumu [24]:

$$E_{lcm} = \eta_{IE} E_{cm}; \quad (3.9)$$

kur: η_{IE} – koeficients, kuru pielieto vieglu betonu elastības moduļa aprēķinam:

$$\eta_{IE} = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2; \quad (3.10.)$$

kur: ρ – betona blīvums (kg/m^3).

Pēc ACI 318-08 elastības modulis ir definēts arī visām betonu stiprības klasēm:

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c}; \quad (3.11.)$$

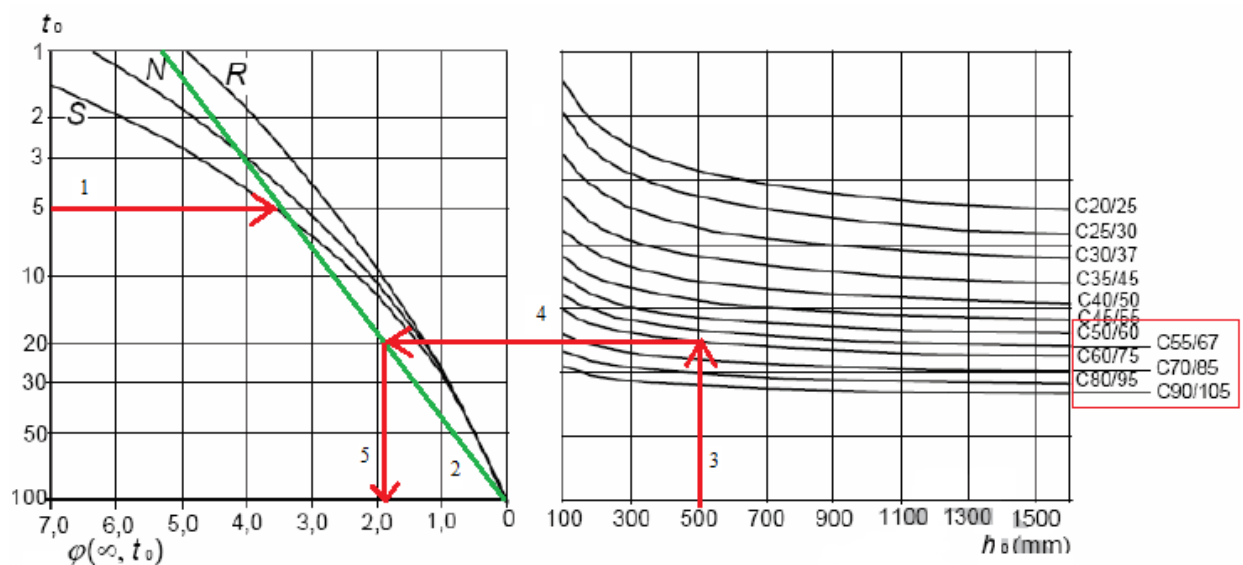
kur: f_c – betona spiedes stiprība.

3.1.3 Šļūde

Šļūde ir neatgriezeniskas deformācijas, kas attīstās ilgā laika posmā zem pastāvīgas slodzes. Betons pieder pie materiālu kategorijas, kam deformācijas ir stipri atkarīgas no slogošanas ilguma, tātad ir pakļauts šļūdei. Betona šļūde ir atkarīga no apkārtējās vides mitruma, elementa izmēriem un betona sastāva.

Šļūdes efekti galvenokārt jāņem vērā ekspluatējamības robežstāvokļu pārbaudēs. Nestspējas robežstāvokļos rukuma un šļūdes efekti jāapskata tikai gadījumos, kad tie ir ievērojami (piemēram, pārbaudot nestspējas robežstāvokļu stabilitāti gadījumos, kad otrās kārtas efekti ir svarīgi, utt.). Citos gadījumos nestspējas robežstāvokļu analīzē tie nav būtiski, ja ir nodrošināti pietiekams elementu plastiskums un pagriešanās kapacitāte. Gadījumos, kad šļūde tiek ņemta vērā, jānovērtē tās aprēķina efekti pie iedarbju kvazi-pastāvīgas kombinācijas neatkarīgi no konkrētās projektā ievērtējamās situācijas, t.i. neatkarīgi no ilgstošas (pastāvīgas), īslaicīgas vai ārkārtējas projektā ievērtējamās situācijas. Vairumā gadījumu šļūdes efektus var novērtēt pie pastāvīgām slodzēm un priekšsprieguma vidējās vērtības [37].

Pēc EN 1992-1-1 šļūdes koeficients $\varphi(t, t_0)$ ir saistīts ar pieskares moduli E_c , kuru var pieņemt vienādu ar $1,05 E_m$. Gadījumos, kad netiek prasīta augsta precizitāte, 3.3. attēlā atrodamo vērtību var uzskatīt par šļūdes koeficientu, nodrošinot, ka betons slogošanas laikā nav pakļauts lielākam par $0,45 f_{ck}(t_0)$ spiedes spriegumam, kur t_0 ir betona vecums slogošanas laikā [37].



att. 3.3. Betona šļūdes koeficienta $\varphi(\infty, t_0)$ noteikšanas metode normālos apkārtējās vides apstākļos [37]

3.3. attēlā dotās vērtības ir spēkā pie apkārtējās temperatūras robežās starp - 40°C un + 40°C un vidējā relatīvā mitruma starp RH = 40 % un RH = 100 %. Tiek izmantoti šādi simboli:

$\varphi(\infty, t_0)$ beigu šļūdes koeficients;

t_0 betona vecums slogošanas laikā (dienās);

h_0 vispārināts izmērs, kas vienāds ar $2A_c/u$, kur A_c ir betona šķērsriezuma laukums un u ir tās daļas perimetrs, kura ir pakļauta žūšanai;

S S klase saskaņā ar EN 1992-1-1 3.1.2 (6) apakšpunktu;

N N klase saskaņā ar EN 1992-1-1 3.1.2 (6) apakšpunktu;

R R klase saskaņā ar EN 1992-1-1 3.1.2 (6) apakšpunktu.

3.1.4 Ilgizturība

Ilgizturībai ir liela nozīme betonu ražošanas industrijā, tāpēc interese par augstas stiprības betoniem nepārtraukti pieaug. Betonu tradicionāli uzskata par materiālu ar augsto spiedes stiprību, tāpēc arī šo betona īpašību pieņēma par svarīgāko. Tomēr betona sabrukšana bieži ir saistīta ar betona ilgizturību, nekā ar spiedes stiprības trūkumu. Tāpēc augstas stiprības betoniem svarīgi būt arī ilgizturīgiem [2].

Ilgizturību definē kā materiāla kalpošanas ilgumu dotajos ekspluatācijas apstākļos. Betona ilgizturības problēmu cēlonis parasti ir kaitīgo suspensiju iesūkšanās, piem., ūdeni, sāļus un sulfātus saturoši maisījumi, kas ar laiku rada izplēšanās, plaisāšanās un turpmāko sairšanu. Samazināt betona caurlaidību līdz efektīvi zēmam līmenim un līdz ar to ierobežot kaitīgas substances iesūkšanās - ir viens no efektīvākiem veidiem, kā uzlabot betona ilgizturību. Samazinot caurlaidību, arī samazinās \bar{U}/C attiecība, jo tas ir vienīgais parametrs, kas ietekmē betona izturību. Augstas stiprības betoni ar zēmu \bar{U}/C attiecību ir vairāk noturīgi pret ķīmiskām iedarbēm, piem., sāļiem, un arī pret nodilumu.

3.1.5 Pretestība pret ķīmiskām iedarbēm

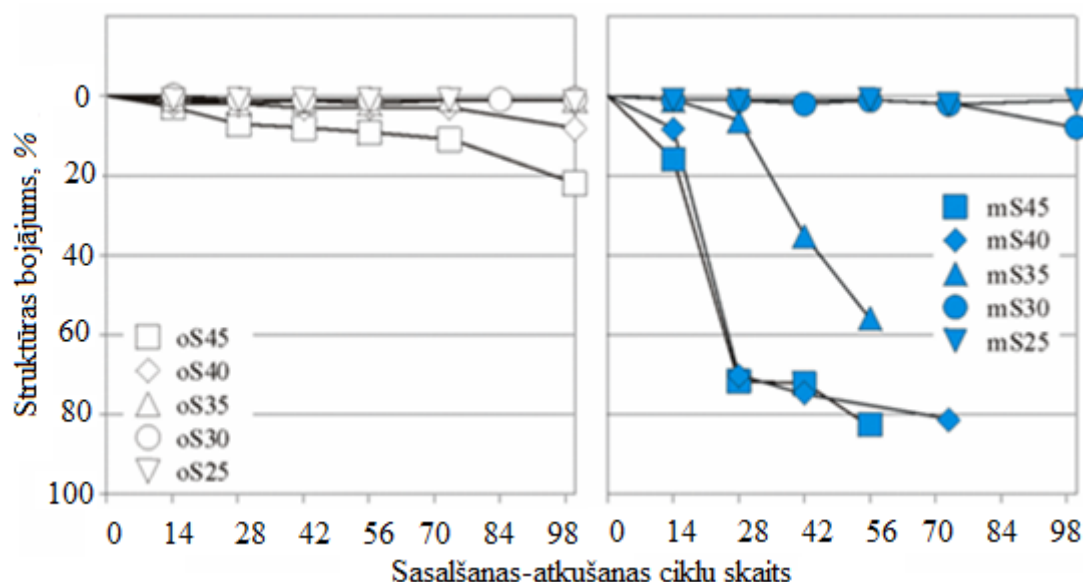
Pateicoties palielinātam blīvumam un mazai kapilāru porainībai, šķidrums un gāzveida līdzekļu iesūkšanas ātrums betoniem ar augstu stiprību ir daudz zemāk par betoniem ar parastu stiprību, un pretestība pret ķīmiskām iedarbēm ir augstāka. Tā kā trūkst praktiskas pieredzes, robežvērtības priekš ļoti stipram, stipram un vājam ķīmiskam uzbrukumam augstas stiprības betoniem bija pieņemtas tādas, kā betoniem ar normālo stiprību. Pirmie

apstiprinājumi par to, ka augstas stiprības betons var pretoties ķīmiskām iedarbēm bez papildu aizsardzības pasākumiem, bija iegūti elektrostacijā Austrijā pie stipra sulfāta skābju uzbrukuma. Augstas stiprības betonus bez papildu aizsardzības pasākumiem izmanto arī pilsētas kanalizācijas būvēšanai, jo tur ir ievērojami augstas ķīmiskas iedarbes. Tātad betoni ar augstu stiprību var nodrošināt agresīvo vižu zemu iesūkšanās tempus. Tas ir ievērojams pluss stieģrojuma korozijas aizsardzībā.

3.1.6 Sasalšanas un atkuššanas ciklu daudzums

Augstas stiprības betoni rada augstu sala pretestību (klases XF1 un XF3). Lai labāk saprastu, kā darbojas augstas stiprības betons sasalšanas-atkuššanas laikā, Kasseles Universitātē bija veikti eksperimenti ar dažādiem betona sastāviem. Cementa daudzums bija pieņemts konstants 500 kg/m^3 , sastāviem bija piemaisīti silīcija putekļi (S) 0; 4% un 8% respektīvi, \bar{U}/C attiecība – no 0.25 līdz 0.45. Eksperimenta gaitā bija pierādīts, ka sastāvi ar \bar{U}/C attiecību <0.35 pat pēc 100 sasalšanas-atkuššanas cikliem saglabāja augstu sala pretestību, neskatoties uz to, bija piemaisīti silīcija putekļi (oS) vai nē (mS).

Mikrostruktūra betonam ar \bar{U}/C attiecību >0.35 bija bojāta pat ar silīcija putekļiem sastāvā. (att.3.4.) Bojājums bija konstatēts jau pēc pāra sasalšanas-atkuššanas ciklu. To izraisīja augstākais mitruma saturs un, kā secība, augstāka līmeņa poru aizpildīšana ar silīcija putekļiem. Eksperiments vēlreiz parāda, cik svarīgi ir zema \bar{U}/C attiecība sevišķi augstas stiprības betonu ražošanā. [21]



att.3.4 Augstas stiprības betonu pretestība pret sasalšanu un atkuššanu [21]

3.1.7 Uguns pretestība

Viena no galvenām betona priekšrocībām par citiem alternatīviem būvniecības materiāliem, tādiem kā tērauds un koksne, ir augsta uguns pretestība un līdz ar to spēja

aizsargāt sabiedrību no riskiem, saistītiem ar drošību. Ugunsizturība ir definēta kā būvelementa spēja saglabāt savu nestspēju ugunsgrēka apstākļos [28]. Vislielākā bīstamība ugunsgrēka laikā, bez saindēšanas ar degšanas produktiem, ir nesošo konstrukciju sabrukums. Konstrukciju sabrukuma pamatā bieži vien ir augstas stiprības betona sprādzienvēda sabrukums. Tāda parādība ir bīstama nesošiem elementiem, īpaši ar nelielu šķērsgriezumu, un elementiem, pakļautiem lielām slodzēm. Priekšlaicīgs sabrukums var radīt ne tikai konstrukciju stiprības un uguns pretestības samazināšanu, bet arī var būt bīstams cilvēku dzīvei un veselībai. Betona sabrukuma pie sildīšanas iemesli ir atkarīgi no betona sastāva un struktūras, betona mitruma stāvokļa, kā arī no deformācijām, kuras izraisa tvaika spiediens cietās betona porās [30]

Rostovas Valsts Būvniecības Universitātē veiktos eksperimentos ir pierādīts, ka pret temperatūras iedarbēm visizturīgākais ir betons ar stiprības klasi C70/85 (B80) un lielāku polimeršķiedru vai kristalhidrātu $Na_2SO_4 \times 10H_2O$ piemaisījumu. No tabulas (tab.3.3) ir redzams, ka visnelabvēlīgākajā gadījumā kolonna ar šķērsgriezumu 400×400mm zem uguns iedarbes pēc 3 stundām saglabā 59.29% no aprēķina nestspējas. Gadījumos, kad uguns iedarbe ir mazāk par 3 stundām, kolonnu nestspēja saglabājas 70-75% no aprēķinātas. Tāda paliekoša nestspēja ir pietiekama, lai nodrošinātu pamatfunkcijas kā ugunsgrēka laikā, tā arī turpmākajā ekspluatācijā [30].

3.2 Sevišķi augstas stiprības betonu fizikāli-mehāniskās īpašības

3.2.1 Spiedes stiprība

Sevišķi augstas stiprības betonu spiedes stiprība ir atkarīga no dažādiem faktoriem. Lai labāk izprastu betona uzvedību, bija veikti vairāki pārbaudījumi un salīdzinājumi. No literatūras avotiem ir apkopoti sekojoši fakti par sevišķi augstas stiprības betonu spiedes stiprību. Betona spiedes stiprību ietekmē apstrādāšanas veids. Tā betoni, kuri ir apstrādāti ar karstu gaisu (90°C) ir stiprāki pār betoniem, kurus uzglabāja ūdenī. Eksperimentāli bija pierādīts, ka betoni pie karstas apstrādes jau pēc 7 diennaktīm iegūst līdz 90% no maksimālās stiprības. Tajā pašā laikā, betoni, kurus iztur ūdenī, pēc 7 diennaktīm sasniedz tikai 70% no savas maksimālās stiprības. Galējā stiprība betoniem atšķiras par 40 MPa, kas ir apmēram 20%. Tabulā 3.4. ir apkopoti dati no eksperimenta, kas bija veikts Kaseles Universitātē. [19]

3.4. tabula

Sevišķi augstas stiprības betonu M1Q un B3Q(ar tērauda šķiedrām) spiedes stiprības pārbaude

Pārbaudes veids	Betona maisījumi					
	M1Q (Ū)	M1Q	starpība	B3Q (Ū)	B3Q (90°C)	starpība

		(90°C)				
	Spiedes stiprība (N/mm ²)					
f_c pēc 7 diennakt.	128	200	+72	140	195	+55
f_c pēc 28 diennakt.	153	208	+55	158	205	+47
f_c pēc 56 diennakt.	180	222	+42	186	>226 ¹⁾	>+40

\bar{U} – uzglabāts ūdenī 20°C, 90°C – 48st. ilga siltumapstrāde; ¹⁾ pārbaudes sistēmas maks. slodze

Sevišķi augstas stiprības betonu spiedes stiprība ir atkarīga no betona sastāvā esošiem piemaisījumiem un piedevām. Ir pierādīts, ka betona spiedes stiprība uzlabojas, ja sastāvā ir kvarca milti. Arī ir konstatēts, ka tādas mikropiedevas bremsē mikroplaisu rašanās un piekarstas apstrādes (2 diennakt. pie temp. 250°C) betona spiedes stiprība sasniedz līdz 330 MPa. Tāpat kvarca milti kalpo par betona spiedes stiprības paaugstinātāju. [24] Spiedes stiprību uzlabo arī tērauda šķiedras. 2.5% no betona apjoma šķiedru ar garumu 9 mm un Ø 0.15 mm paaugstina spiedes stiprību līdz 20 % salīdzinājumā ar betonu bez šķiedrām. Īsas un vienmērīgi sadalītas tērauda šķiedras ierobežo plaisu veidošanās un uzlabo betona pretestību pret graužošām slodzēm. [24] Šodien zinātnieki spriež par to, ka šķiedras ar perpendikulāro izvietojumu pret betonelementa garuma asi paaugstina to spiedes stiprību, tāpat arī šķiedru izvietojumam sastāvā ir nozīme. [19]

Sevišķi augstas stiprības betoniem nav noteiktas aprēķinu normas, piem., EN 206-1 betona lielāka stiprības klase ir C 100/115. Ja augstas stiprības betonu C 200 aprēķina spiedes stiprību rēķina pēc (3.2) vienādojuma, tad γ_c papilddrošuma koeficients šajā gadījumā būs vienāds $\gamma_c = 1.429$. [16] Tomēr tādu koeficienta vērtību nevar uzskatīt par drošu. Tāpēc ir piedāvāts norobežot γ_c koeficienta vērtību priekš sevišķi augstas stiprības betoniem bez šķiedrām ar :

$$1 \leq \gamma_c \leq 1.25. \quad (3.12)$$

Betoniem ar šķiedrām koeficientam γ_c jābūt nelielākam par 1.11, kas atbilst augstas stiprības betonu drošuma koeficienta vērtībai pēc DIN 1045-1 normām.

Sevišķi augstas stiprības betonu aprēķiniem pielieto arī franču direktīvu AFGS/SETRA un japāņu direktīvu sevišķi augstas stiprības betoniem ar fibru JSCE.

Aprēķina spiedes stiprība pēc AFGS/SETRA ir testēta uz betona cilindriem ar Ø70 mm; h=140 mm un Ø110 mm; h=220 mm un ir definēta sekojoši:

$$\sigma_{bc} = \frac{0.85}{\theta \gamma_b} f_{cj}; \quad (3.13)$$

kur: θ – koeficients, atkarīgs no pieliktas slodzes ilguma:

$\theta = 1.0$ slodzei, kas pielikta vairāk par 24 st.;

$\theta = 0.9$ slodzei, kas pielikta no 1 līdz 24 st.;

$\theta = 0.85$ slodzei, kas pielikta mazāk par 1 st.

γ_b – drošuma koeficients, rekomendēta vērtība ir 1.35-1.5;

f_{cj} – prognozējama betona spiedes stiprība pēc laika posma (j).

Sevišķi augstas stiprības betonu ar fibrām spiedes stiprība pēc japāņu normām JSCE bija testēta uz cilindra $\varnothing 100 \text{ mm}$ un ir definēta kā:

$$f_{cd} = 0.85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}; \quad (3.14)$$

kur: f_{ck} – betona spiedes stiprība;

γ_c – drošuma koeficients, $\gamma_c = 1.3$.

Salīdzinot piedāvātās formulas (3.2), (3.13) un (3.14), varam konstatēt, ka galvenā atšķirība ir drošuma koeficienta γ vērtības. Ja neņem vērā piedāvāto AFGC/SETRA sloģojuma koeficientu θ , formula sevišķi augstas stiprības betonu aprēķina spiedes stiprības noteikšanai izskatās šādi:

$$f_{cd} = 0.85 \frac{f_{ck}}{\gamma_{UHSC}}. \quad (3.15.)$$

Liela atšķirība ir drošuma koeficientam γ_{UHSC} . Tabulā 3.5. ir apkopotas koeficienta vērtības. Kā redzams, koeficienti franču un japāņu direktīvos ir līdzīgi, bet ar Eiropas normām starpība sastāv līdz 0.585.

3.5. tabula

Drošības koeficienta γ_{UHSC} vērtību salīdzinājums

Normas nosaukums	Koeficienta γ_{UHSC} vērtības	
AFGC/SETRA	1.5	Īpaša gadījuma: 1.3
JSCE	1.3	
EN 1992-1-1 DIN 1045-1	bez šķiedrām	Monolītbetonam: $1.5 \cdot 1.25 = 1.885$ Gataviem elementiem: $1.35 \cdot 1.25 = 1.688$
	ar šķiedrām	Monolītbetonam: $1.5 \cdot 1.11 = 1.665$ Gataviem elementiem: $1.35 \cdot 1.11 = 1.499$

Piedāvātas drošības koeficienta γ_{UHSC} vērtības pēc DIN 1045 bija pārbaudītas eksperimentāli. Pēc 56 sevišķi augstas stiprības betonu paraugu testēšanas, bija piedāvāts tāds drošības koeficienta γ_{UHSC} variants [16]:

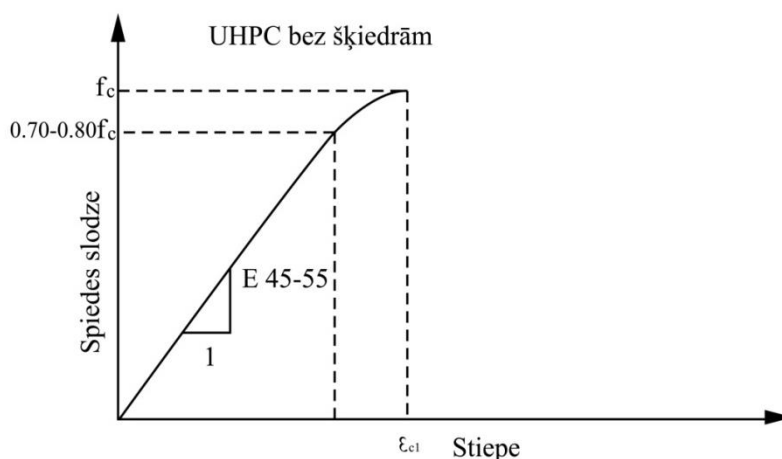
$$\gamma = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} \cdot \gamma_{conv}; \quad (3.16.)$$

kur: γ_{m1} – koeficients, kas atkarīgs no materiālu plūstamības;
 $\gamma_{m2} = 1.05$; koeficients, kas atkarīgs no elementa ģeometriskiem parametriem;
 $\gamma_{conv} = 1.15$; koeficients, kas atkarīgs no starpības starp laboratorijā un būvvieta iegūtiem datiem.

Koeficienta γ_{m1} vērtības mainās atkarībā no betonu spiedes stiprības klasēm no 1.25 priekš C20/25 līdz 1.07 priekš C 100/115. Līdz ar to mainās arī koeficienta γ kopējā vērtība. Tomēr pieņemot kādu no piedāvātiem variantiem, kā vienīgo pareizo, ir iespējams tikai pēc kārtīgiem izmeklējumiem un praktiskiem pierādījumiem [16].

3.2.2 Deformācijas un elastības modulis

Sevišķi augstas stiprības betoni, neatkarīgi no šķiedru daudzuma sastāvā (vai pilnīgi bez tām), parāda lineāri-elastiskās deformācijas pie sprieguma, kas ir vienāds ar 70-80% no betona spiedes stiprības. Tādas betona attiecības var novērot neatkarīgi no tā, kādas stiprības pildvielas bija izvēlētas. Betons, kas nesatur šķiedras, sabrūk ātrāk par betonu ar šķiedrām, sabrukums notiek sprādzienveidā. Deformāciju diagrammā krītošas līnijas nav, tātad pēc robežstāvokļa sasniegšanās betons vairs neuzņem slodzi [20]. (att.3.5)

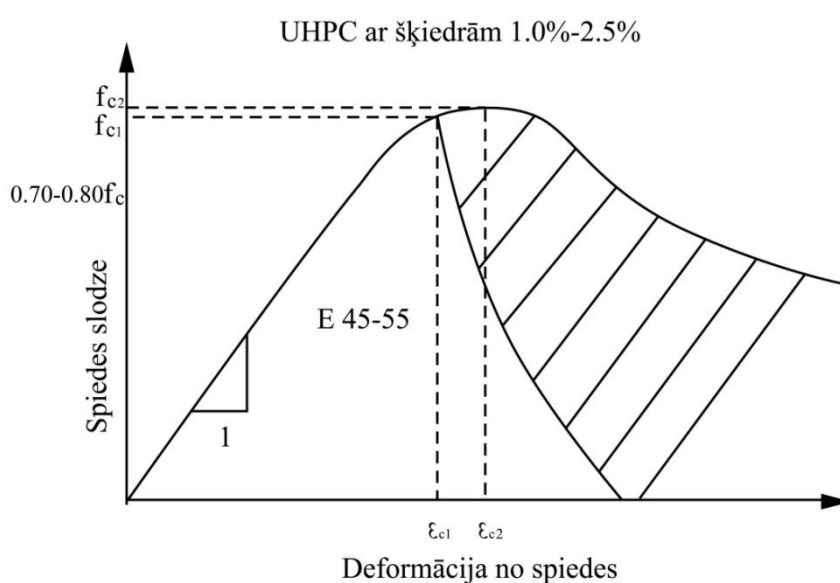


att.3.5. Sprieguma deformācijas sakarības attēlojums sevišķi augstas stiprības betoniem bez šķiedrām [20]

Sevišķi augstas stiprības betoni ar tērauda šķiedrām sastāvā labi parādīja sevi slodzes iedarbībā. Tā betona cilindrs ar 4% šķiedru daudzumu no apjoma arī pēc sabrukuma no

graujošās slodzes turpina saglabāt savas nestspējas īpašības. Līdz maksimāli iespējamās slodzes sasniegšanai betona paraugam ir lineāri-elastiskās deformācijas. Tomēr 4% šķiedru no betona apjoma pasliktina to iestrādājamību, kā arī prasa nestandarta ražošanas paņēmienus. [16]

Šķiedras labi ietekmē betona pēcsabrukuma uzvedību. Deformāciju diagrammas (att.3.6.) kāpjoša līnija gandrīz neatšķiras no iepriekšējās diagrammas (att.3.5.), taču krītoša līnija ir pilnīgi citāda. Sevišķi augstas stiprības betonu pēcsabrukšanas uzvedība ir atkarīga, galvenokārt, no šķiedru daudzuma, garuma un diametra, kā arī no to izvietojanas. Tāpēc pēcsabrukuma uzvedību ir grūti prognozēt, un deformāciju diagrammas katram betona sastāvam atšķiras. [20]



att.3.6. Sprieguma deformācijas sakarības attēlojums sevišķi augstas stiprības betoniem ar šķiedrām [20]

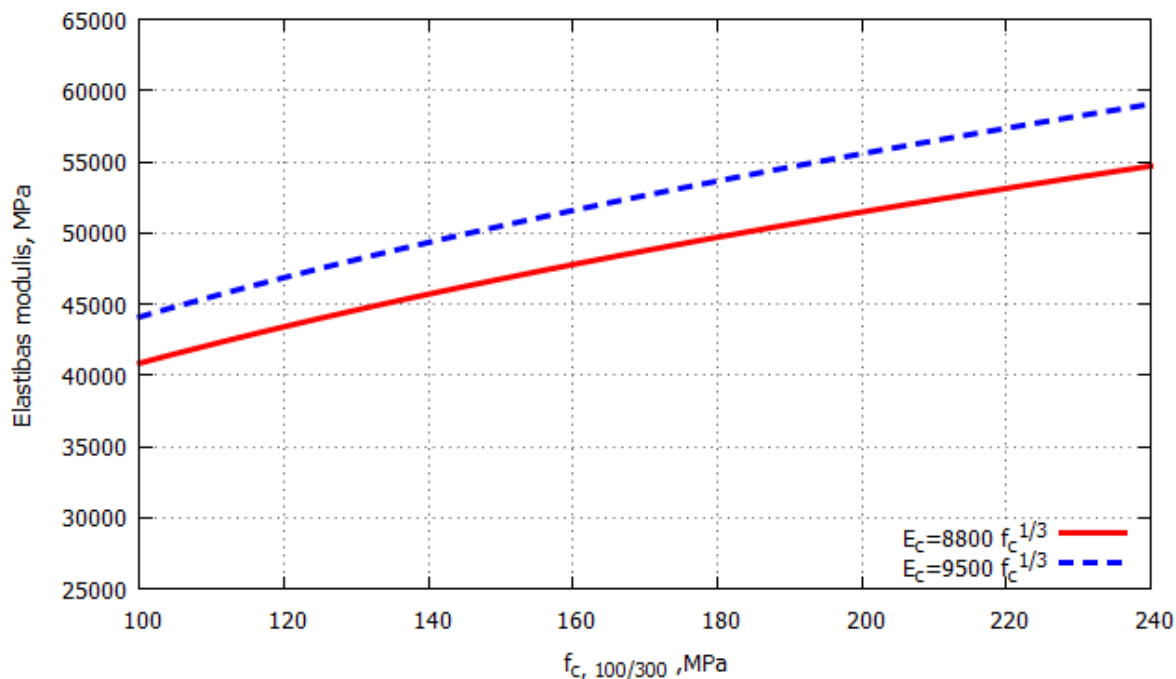
Sakarā ar blīvo mikrostruktūru sevišķi augstas stiprības betoniem ir lielāks elastības modulis no 45000 līdz 55000 MPa (pie spiedes stiprības 150 – 230 MPa). Ja ir izmantotas īpaši stipras piedevas, piem., boksīts, elastības modulis palielinās līdz 70000 MPa. Tāpat kā parastās stiprības betoniem, sevišķi augstas stiprības betonu elastības modulis atkarīgs no vairākiem faktoriem. Tā kā būvelementi, kas uztaisīti no sevišķi augstas stiprības betoniem, pārsvarā ir plāni un jūtīgi pret deformācijām, elastības modulis katram betonelementam ir jāpārbauda atsevišķi izmēģinājumu gaitā. [16]

Vācu normās DIN 1045-1 un CEB FIP MC 90 sevišķi augstas stiprības betonu elastības moduļa vērtība ir paaugstināta. Tas bija pierādīts ar Leipciga Universitātes eksperimenta rezultātiem. Pārbaudes laikā bija noteiktas sekojošas attiecības starp elastības moduli E_c un cilindriskas spiedes stiprību f_c sevišķi augstas stiprības betonu veidiem :

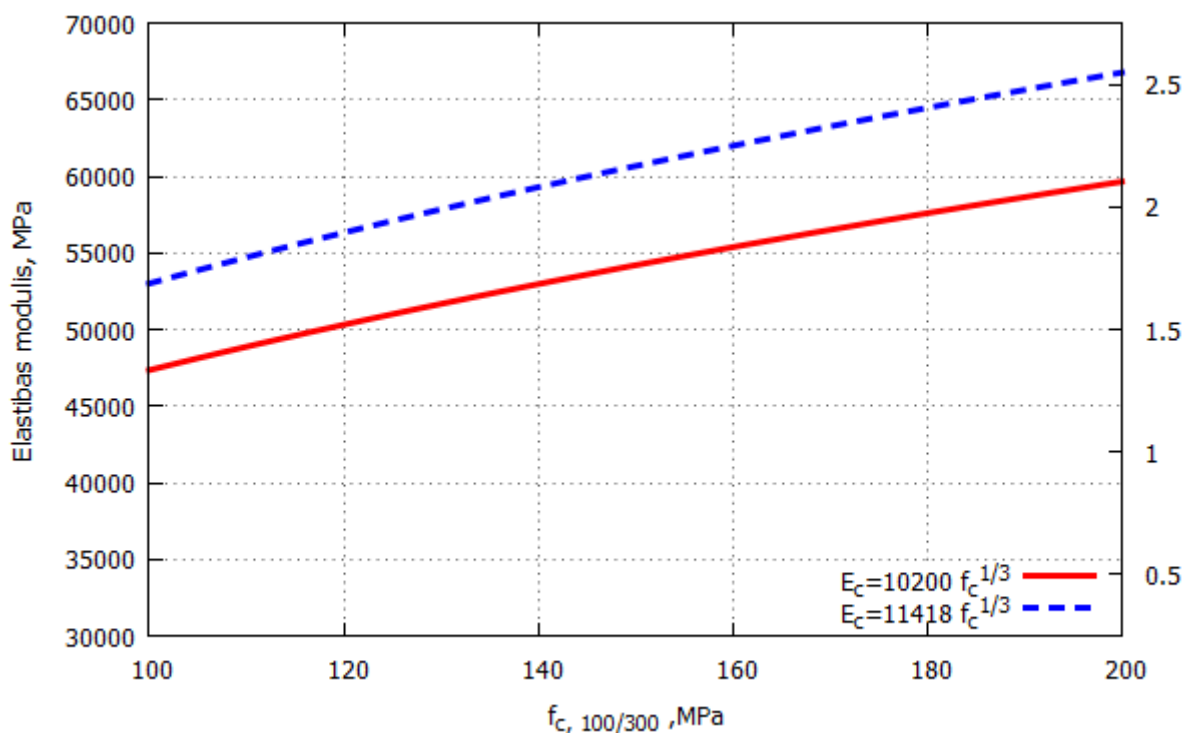
- Smalkgraudu sastāviem $E_c=8800 \cdot f_c^{1/3}$;

- Rupjgraudu sastāviem ar bazalta šķembām $E_c=10200 \cdot f_c^{1/3}$.

DIN 1045-1 normās smalkgraudu sastāviem elastības modulis ir vienāds $E_c=9500 \cdot f_c^{1/3}$, un CEB FIP MC 90 normās elastības modulis rupjgraudu sastāviem ar bazalta šķembām ir vienāds $E_c=11418 \cdot f_c^{1/3}$. Sakarības ir parādītas grafiski (att.3.7 un 3.8) [17]



att.3.7. Sakarība starp elastības moduli un spiedes stiprību smalkgraudu sastāviem



att.3.8. Sakarība starp elastības moduli un spiedes stiprību rupjgraudu sastāviem

3.2.3 Šļūde

Sevišķi augstas stiprības betoniem šļūdes koeficients ir vienāds 0.8 (bez karstas apstrādes) un 0.2 (ar karstu apstrādi) [19]. Vērtības sakrīt ar pētījuma datiem, iegūtiem Kaseļē un Leipciņā. Eksperimenta gaitā bija pārbaudīti smalkgraudu (M1Q) un rupjgraudu (B3Q) augstas stiprības betoni ar 2.5% tērauda šķiedru sastāvā. Šļūdes deformācijas ir apkopotas tabulā 3.6. un grafikā 3.9.

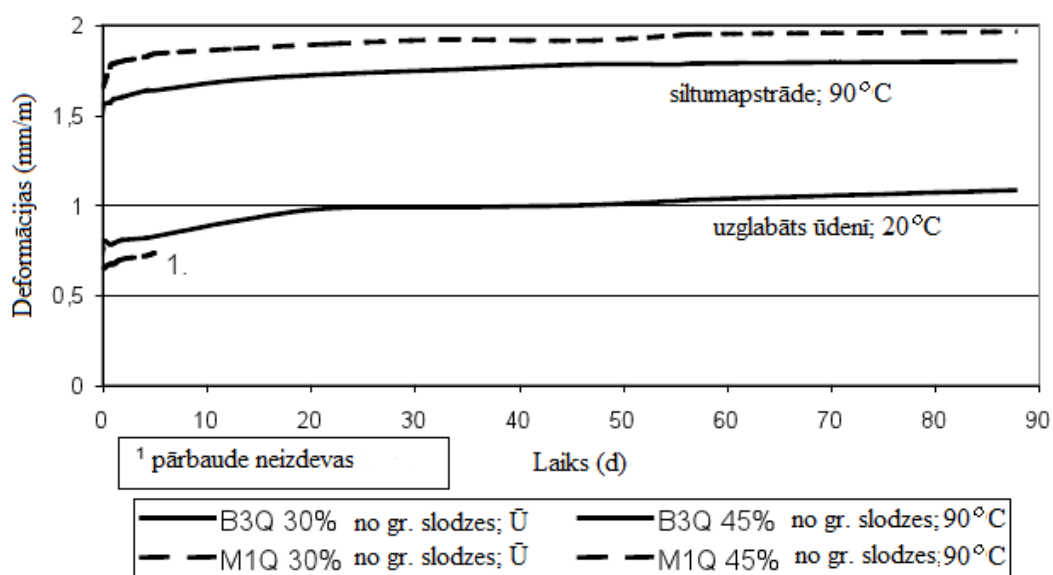
3.6. tabula

Augstas stiprības betonu šļūdes deformācijas (‰)

Pieliktas slodzes ilgums (d)	M1Q Ū (‰)	M1Q 90°C (‰)	B3Q Ū (‰)	B3Q 90°C (‰)
0	0,650	1,650	0,731	1,506
1	0,671	1,785	0,786	1,588
5	0,734	1,840	0,824	1,638
15	0,732	1,869	0,910	1,694
30	0,682	1,919	0,988	1,750
45	0,650	1,913	0,998	1,781
60	0,642	1,950	1,028	1,788
90	-	1,963	1,081	1,800
$\varphi(t_{90})$	-	0,189	0,470	0.195

Ū – uzglabāts ūdenī 20°C, 90°C – 48st. ilga siltumapstrāde;

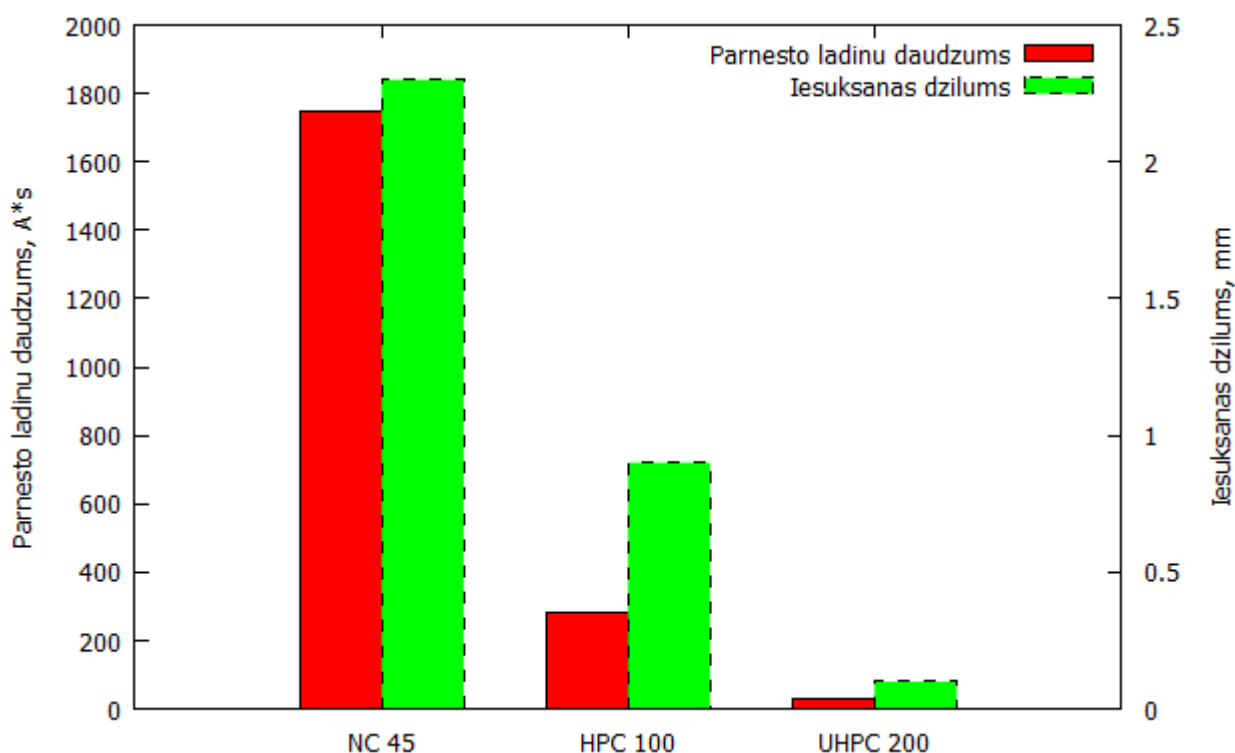
Pielikta slodze vienāda 30% un 45% no graužošās slodzes



att.3.9. Šļūdes deformācijas [19]

3.2.4 Pretestība pret ķīmiskām iedarbēm

Pēc savas struktūrās sevišķi augstas stiprības betoni ir blīvi, poru un kapilāru daudzums ir niecīgs. Šis faktors saglāba betonu no kaitīgām ķīmiskām vielām un neļauj tām iesūkties dziļi iekšā. Tādi betoni labi pretojās sulfātu un hlorītu grupas ķīmiskām vielām. Lai pierādītu sevišķi augstas stiprības betonu pretestību pret hlorītiem, bija veikts eksperiments. Eksperimentam bija paņemtas 35 mm biezas betonu plātnes, kuras ievietoja starp divām kamerām. Pirmajā kamerā atrodas ūdens, otrajā – 10% hlorīta šķīdums. Bija salīdzināti normālas stiprības betons (NC); augstas stiprības betons (HPC) un sevišķi augstas stiprības betons (UHPC). Eksperimenta gaitā bija noskaidrots, cik hlorītu lādiņu pārsūcas caur betonu plātnēm ūdenī un cik dziļi hlorīti iesūcās betona plātņu iekšā (att.3.10.) [26]

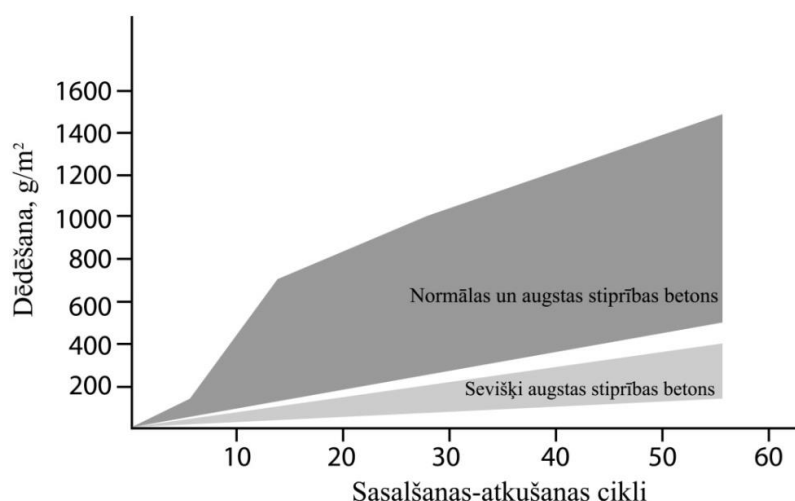


att.3.10. Sevišķi augstas stiprības betonu pretestības pret hlorītiem testa rezultāti [26]

Kā redzams no grafika, augstas stiprības betons gandrīz nav pakļauts hlorītu iedarbībai. Hlorīti iesūcas tikai uz 1 mm betona plātnes iekšā un hlorīta lādiņi gandrīz nepārsūcas caur plātņi.

3.2.5 Sasalšanas un atkušanas ciklu daudzums

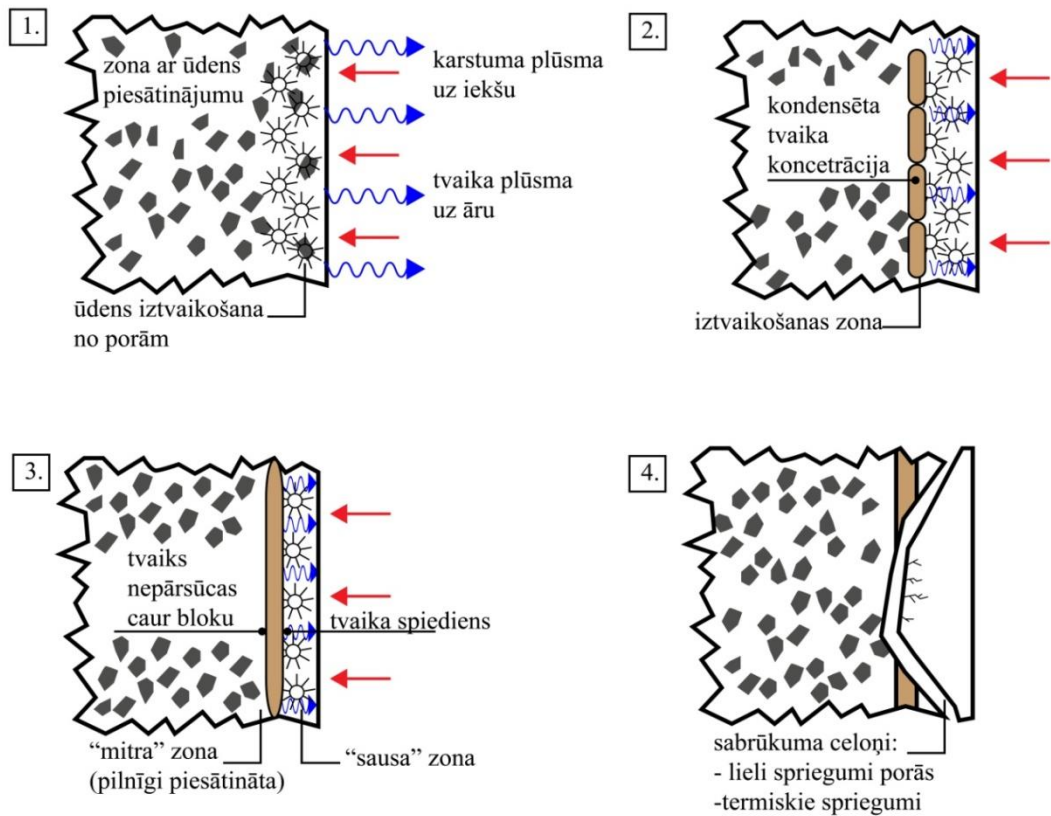
Tā kā no sevišķi augstas stiprības betoniem izgatavo bruģakmeni un to izmanto ceļu un tiltu būvē, ir ļoti svarīgi pievērst uzmanību sasalšanas-atkušanas cikliem. Parastas stiprības betonu pretestība pret sasalšanu un atkusni palielinās ar Ū/C attiecību samazinājumu, jo samazinās arī kapilāru poru daudzums. Sevišķi augstas stiprības betoniem Ū/C attiecība ir aptuveni 0.3, kas ir daudz zemāk par parastas stiprības betoniem. Pateicoties blīvākai struktūrai, tādiem betoniem ir paaugstināta pretestība pret sasalšanu un atkusni. Pārbaudījumā uz masas zaudējumiem pēc 28 un 56 sasalšanas-atkušanas cikliem bija konstatēts, ka sevišķi augstas stiprības betoni ar spiedes stiprību apm. 200 MPa zaudē 200g/m² pēc 28 cikliem un 290 g/m² pēc 56 cikliem. Tas ir līdz 5 reizēm mazāk, salīdzinot ar parastas stiprības betonu rezultātiem. Pārbaudes rezultāti parādīti att.3.11 [26]



att.3.11. Dēdēšanas salīdzinājums starp normālas/augstas stiprības betoniem un sevišķi augstas stiprības betoniem [26]

3.2.6 Uguns pretestība

Uguns pretestības jautājumā sevišķi augstas stiprības betoni atšķiras no parastas stiprības betoniem. Pie uguns slodzes brīvais ūdens no betona iztvaikojas pie temperatūras 105 °C. Daļa iekļūst betona elementa iekšējos slāņos un kondensējas zonās, kuras vēl nav pakļautas karstuma iedarbībai. Tāds process pieved pie kondensācijas zonas pilna pildījuma ar ūdeni. Līdz ar to tvaiku tālāka difūzija šajā zonā vairāk nav iespējama. Tā kā parastas stiprības betonu struktūrā ir diezgan lielas poras, tvaika spiediens tur samazinās, un betons nesabrūk tik ātri. Sevišķi augstas stiprības betona blīvas struktūras dēļ tvaika spiediens nesamazinās, bet palielinās. Tas ved uz betona straujo sabrukšanu. Attēlā 3.12. var redzēt betona sabrukšanas procesu no karstuma iedarbēm.[16]



att. 3.12. Sevišķi augstas stiprības betona sabrukšanas process no karstuma iedarbēm [16]

Otrais cēlonis paaugstināto betona iekšējo spriegumu rašanās ir pildvielu izvēle. Sevišķi tas attiecas uz kvarca saturošus pildvielām. Ir pierādīta kvarca anomālija, kad pie temperatūras $573\text{ }^{\circ}\text{C}$ α -kvarcs pārveidojas β -kvarcā. Pie tādas fāžu pārveidošanas palielinās kvarca izmēri, un līdz ar to palielinās iekšējie spriegumi. [16]

Lai uzlabotu betona uguns pretestību, rekomendēts lietot polipropilēna (nevis tērauda) šķiedras. Tas ir izskaidrojams ar to, ka polipropilēna kausēšanas temperatūra ir $170\text{ }^{\circ}\text{C}$. [16]

4 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU PRIEKŠROCĪBAS UN TRŪKUMI

Augstas stiprības betonu priekšrocības ir skaidri redzamas. Augsta noturība un stiprība, niecīga caurlaidība un spēja pretoties ķīmiskām iedarbēm padara tādus betonus par neaizstājamiem tur, kur ir svarīga ilgstošas noturības nodrošināšana. Augstas stiprības betonu ekonomiska vērtība par 1m^3 sastāv līdz 500 EUR (pēc Boyuges). Salīdzinājumā ar parastas stiprības betoniem, kuru vērtība par 1m^3 ir robežās no 60 līdz 160 EUR, augstas stiprības betonu izmantošana izskatās dārga un neizdevīga. Tomēr projekta gala izmaksas var atšķirties vairākās reizēs augstas stiprības betonu labā, jo izmantota betona apjoms samazinās.

Piemēram, augstas stiprības betonu izmantošana Kyllta tilta (Vācija) būvniecībā samazināja izmaksas no 3.39 milj. EUR līdz 1.82 milj. EUR. Arī salīdzinājumā ar tēraudu priekšrocība ir augsta stiprības betoniem. Tabulā 4.1. ir salīdzināti konstrukciju elementi ar vienādu nestspēju no augstas stiprības betona (UHPC), tērauda, parastas stiprības betona (NC) ar stiegrojumu un iepriekšsaspriegta parastas stiprības betona [16].

4.1.tabula

Cenu salīdzinājums sijām ar vienādu nestspēju

	UHPC	Tērauds	NC ar stiegrojumu	Iepriekšsaspriegts NC
Augstums(mm)	370	350	700	700
Platums(mm)	320	300	350	600
Svars (kg/m)	140	112	467	530
Cena(EUR/m)	30	33	26	33

Augstas un sevišķi augstas stiprības betons ļauj projektēt vieglākas konstrukcijas, samazinot pielietota betona daudzumu. Konstrukcijas no sevišķi augstas stiprības betona pēc savas nestspējas var konkurēt pat ar tērauda konstrukcijām. Attēlā 4.1. ir salīdzināti dažādi materiāli ar vienādu nestspēju [16]:

SIJU MASSA				
	Ductal (UHPC)	Tērauds	Iepriekšsaspriegts betons	Dzelzsbetons
kg/m	140	112	467	530

att. 4.1. Materiālu ar vienādu nestspēju salīdzinājums [16]

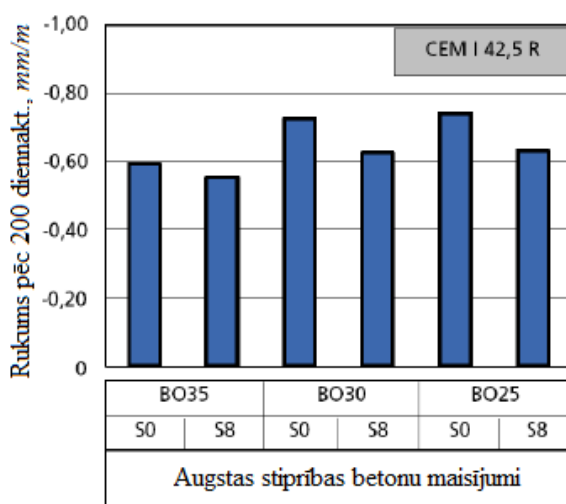
Par vēl vienu augstas stiprības betonu priekšrocību var nosaukt faktu, ka materiāls ir draudzīgs apkārtējai videi. Negatīvs moments betonu ražošanā ir CO₂ izdalīšana. Pateicoties izmantojama betona daudzuma samazināšanai, ir iespējams samazināt CO₂ kaitīgo izdalīšanu līdz 60 % salīdzinājumā ar parastas stiprības betoniem [25].

Tādu materiālu varētu uzskatīt par ideālo, tomēr augstas stiprības betoniem ir savi trūkumi. Salīdzinājumā ar parastiem vidējas stiprības betoniem tie ir trauslāki. Pēc robežsprieguma pārsniegšanas augstas stiprības betoni sabrūk, pazūd spēja nest slodzi. Sprieguma-deformācijas sakarība ir parādīta attēlā 4.4., kur var labi redzēt šo augstas stiprības betonu īpašību. Lai nodrošinātu konstrukcijas stabilitāti un uzlabotu augstas stiprības betona elastīgumu un stiprību, ir jāveic papildus pasākumi, piem., šķiedru izmantošana. Ir pierādīts, ka jau 1-2% šķiedru daudzums no apjoma uzlabo betona elastīgumu. Sakarība ir parādīta att. 4.5., kur var labi redzēt, ka arī pēc sabrukšanas augstas stiprības betons ar šķiedrām turpina uzņemt slodzi [20]. Mūsdienās betona maisījumos izmanto tērauda, oglekļa, stikla, polimēru un kompozīta šķiedras. Vairāk par šķiedru ietekmi uz augstas stiprības betoniem ir aprakstīts 3.sadaļā.

Augstas stiprības betoniem ir raksturīga plaisāšana jau agrā vecumā. Tāda trūkuma galvenais cēlonis ir autogēnais rukums, kas nav atkarīgs no iekšējiem faktoriem, tādiem kā mitruma zudums un temperatūras izmaiņas. Betona plastiskajā stāvoklī cementa apjoms samazinās pēc hidrotācijas, tādu procesu sauc par ķīmisko rukumu. Pēc betona sacietēšanas notiek autogēnais rukums, jo cements turpina hidrotācijas procesu porās un kapilāros, notiek tā saucama betona iekšēja žūšana [28].

Pie zemas Ū/C attiecības cements nerasniedz pilno hidrotāciju sacietēšanas procesā. Tas ietekmē visus procesus, kas ir atkarīgi no hidrotācijas – apjomu izmaiņu, stiprības palielinājumu un siltuma izdalīšanu [28].

Autogēnais rukums šobrīd nav pilnīgi izpētīts. Betoniem ar \bar{U}/C attiecību vairāk par 0.42 tādu rukumu neuzskata par svarīgu, jo tas gandrīz neietekmē betona īpašības, apjomu izmaiņas notiek galvenokārt žūšanas procesā. Bet ar \bar{U}/C attiecības samazinājumu (augstas stiprības betoniem) autogēnais rukums kļūst par dominējošo faktoru un var sasniegt līdz 1mm/m. Autogēna rukuma lielāko daļu var ievērot laika posmā no dažām stundām līdz vairākām diennaktīm (att. 4.2). Zema \bar{U}/C attiecība un liela cementa daļa ir galvenie, bet nav vienīgie faktori, kuri palielina autogēno rukumu. Autogēna rukuma palielināšanu ietekmē arī cementa ķīmiskais sastāvs un maluma frakcija, kā arī plastifikatoru un superplastifikatoru izmantošana. Auksti laika apstākļi vai palēninātāju izmantošana arī palielina autogēno rukumu un laiku, kurā to var ievērot [13].



att.4.2. Augstas stiprības betonu autogēna rukuma novērošana [13]

Metodes, kuras samazina rukumu un plaisāšanās agra vecumā, ir balstītas uz cementa modifikācijas, minerālo un ķīmisko piedevu izmantošanas, kā arī šķiedru jeb fibru izmantošanas. Tomēr viens no svarīgiem aspektiem, par kuru nedrīkst aizmirst, ir betona pareiza aprūpe. Izšķir ārējo un iekšējo betonu aprūpes metodes. Vairums no tām attiecas uz ārējo aprūpi. Tās izmanto kā parastas stiprības, tā arī augstas stiprības betoniem, un tās iekļauj sevī ūdens izsmidzināšanu, piesātināto ar ūdeni seguma izmantošanu, speciālas aizsargkārtas izmantošanu u.c. Šobrīd nav līdz galam skaidrs, kāds aprūpes veids ir vairāk piemērots augstas stiprības betoniem. Ir viedoklis, ka augstas stiprības betonu aprūpei jābūt līdzīgai parastas stiprības betoniem, vai arī aprūpe pavisam nav vajadzīga betonu blīvas struktūras dēļ. Tomēr ir noskaidrots, ka betoniem, kuriem ir iespējams liels autogēnais rukums un plaisāšana, vajadzīga ūdens aprūpe vismaz 7 diennakt. laikā [28].

Šodien aktuāla ir betona iekšējā aprūpe, kuru intensīvi pēta zinātnieki vairākās valstīs. Tā ir aprūpe ar atšķirīgo koncepciju, kura balstīta uz betonu piesātinājumu ar nepieciešamo ūdens daudzumu labākai hidrotācijai no iekšas. To var panākt ar speciālām piedevām, kuras pievieno betona sastāvam jebkurā stadijā. Tāda aprūpe uzlabo betona noturību un stiprību, samazina autogēno rukumu un plaisāšanas iespēju, kā arī pasargā betonu no priekšlaicīgas izžūšanas, ja tas atrodas nelabvēlīgos sausus apstākļos [28].

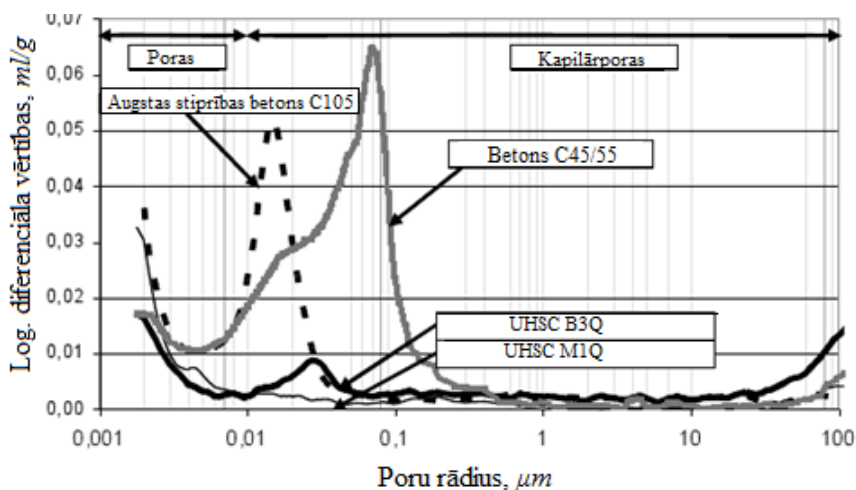
5 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU SALĪDZINĀJUMS AR PARASTIEM VIDĒJAS STIPRĪBAS BETONIEM

Šodien betons ir viens no visbiežāk izmantojamiem materiāliem būvniecībā. Galvenais priekšnoteikums materiālu izvēlē ir atbilstība konstruktīvām prasībām. Neskatoties uz parasto vidējas stiprības betonu popularitāti, paaugstinās interese augstas un sevišķi augstas stiprības betoniem, ko sauc par nākotnes materiālu. Tāds betons atšķiras ar augstu būvniecisko tehnoloģiskumu, pastiprinātu ilgizturību un īpaši augstām betona mehāniskajām īpašībām. Salīdzinājumā ar tradicionālu, parastu betonu, tādām betonam ir sekojošas priekšrocības :

- 1) daudz vieglāk iestrādāt un noblīvēt;
- 2) sasniedz augstāku agro stiprību;
- 3) tas uzrāda ļoti ilgā ekspluatācijas periodā tādas mehāniskās īpašības kā stiprību, abrazīvo izturību vai triecienizturību un izteikti zemu caurlaidību;
- 4) uzrāda noturīgu tilpuma stabilitāti, tātad mazāk deformējas un mazāk plaisā;
- 5) ilgāk iztur agresīvu ķīmisku reaģentu iedarbību, sasalšanas un atkuššanas ciklus,
- 6) demonstrē pastiprinātu ilgizturību.

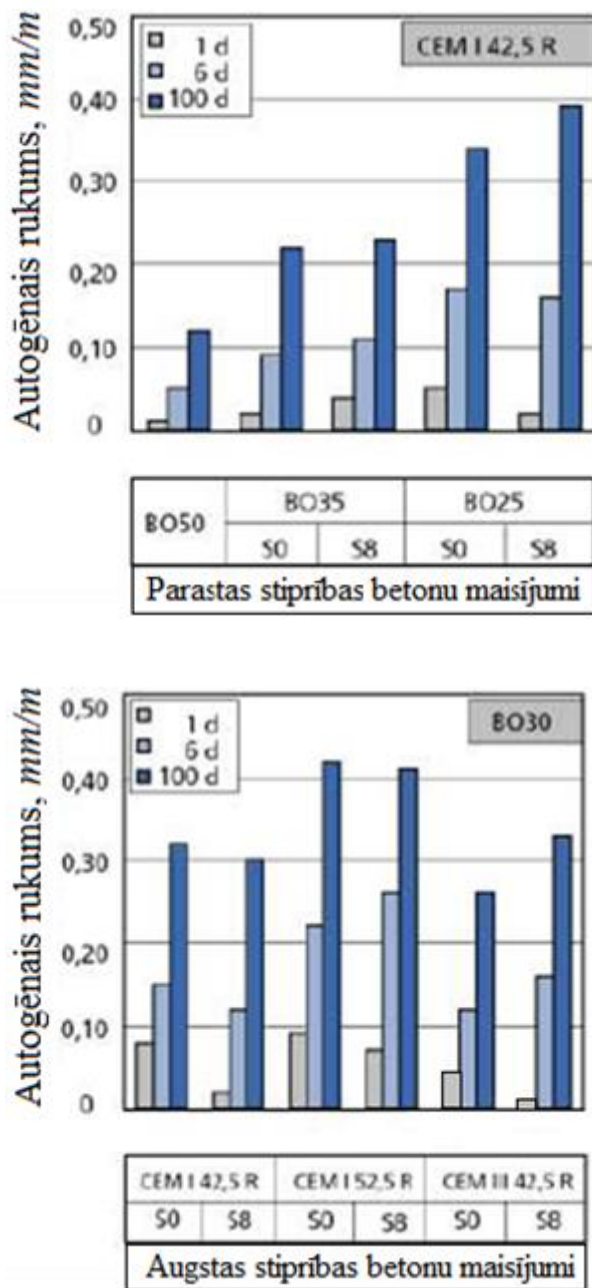
Augstas stiprības betoniem raksturīga zema porainība blīvas struktūras dēļ. Tas pozitīvi atspoguļojas uz betona īpašībām, tādām kā paaugstināta pretestība pret karbonizāciju, hlorītu iesūkšanās, ķīmiskām iedarbēm, kā arī sasalšanas-atkuššanas ciklu palielinājums. Sīkāk par augstas stiprības betonu īpašībām ir aprakstīts sadaļās 4.1. un 4.2.

Poru daudzums sevišķi augstas stiprības betonā ir apmēram 4-6% no apjoma, kas ir gandrīz divreiz mazāk par augstas stiprības betonu rādītājiem – apm.11%, un trīsreiz zemāk par parastās stiprības betoniem, kuriem poru daudzums ir gandrīz 15% no apjoma. Attēlā 5.1. ir salīdzināts un grafiski parādīts poru daudzums dažādas stiprības betoniem [26].



att. 5.1. Poru daudzumu salīdzinājums parastās stiprības betonam C45/55, augstas stiprības betonam C105 un sevišķi augstas stiprības betoniem B3Q un M1Q [26]

Augstas stiprības betonu blīvai struktūrai ir arī negatīva ietekme. Zema Ū/C attiecība rada betonu iekšējo izžūšanu un autogēno rukumu, kas ir plaisāšanas cēlonis agrā vecumā pirms galīgas stiprības sasniegšanas. Kā rāda eksperimenti un pētījumi, autogēnais rukums augstas stiprības betoniem var pārsniegt parastas stiprības betona rādītājus līdz 4 reizēm. Autogēnais rukums pieaug ar betona vecumu. Tā pēc 6 diennakt. augstas stiprības betona paraugu rukums sastāv 0.10-0.25 mm/m, bet pēc 100 diennakt. - 0.2-0.4 mm/m (atkarībā no betonu sastāva). Tajā pašā laikā parastas stiprības betonu rukums pēc 100 diennakt. sasniedz 0.1 mm/m (att. 5.2.) [13]



att. 5.2. Parastas stiprības betona un augstas stiprības betona autogēna rukuma salīdzinājums [13]

Apkopojot betonu fizikāli-mehāniskās īpašības un salīdzinot tās, varam konstatēt, ka augstas stiprības betonu rādītāji vairākās reizēs pārsniedz parastas stiprības betonu rezultātus (tab.5.1.)

5.1.tabula

Parastas un augstas stiprības betonu īpašību salīdzinājums

Betona īpašības	Parastais betons	HSC	UHPC
Cilindriska spiedes stiprība, <i>MPa</i>	20 – 40	55 – 100	150-250
Elastības modulis, <i>Gpa</i>	25 – 30	35-45	50-70
Ū/C attiecība	0.4-0.5	0.3	0.25-0.3
Stiprības attīstības galvenais periods (dienās)	7 – 10	4-6	2-4
Sasalšanas-atkušanas ciklu daudzums	10	100	>100
Pretestība pret ķīmiskām iedarbēm	zema	vidēja	augsta
Porainība, % no apjoma	15	11	4-6
Autogēnais rukums pēc 100 d., <i>mm/m</i>	0.1-0.4	0.3-0.45	0.5-1
Cena par m ³ , <i>Ls</i>	50-60	75	līdz 500

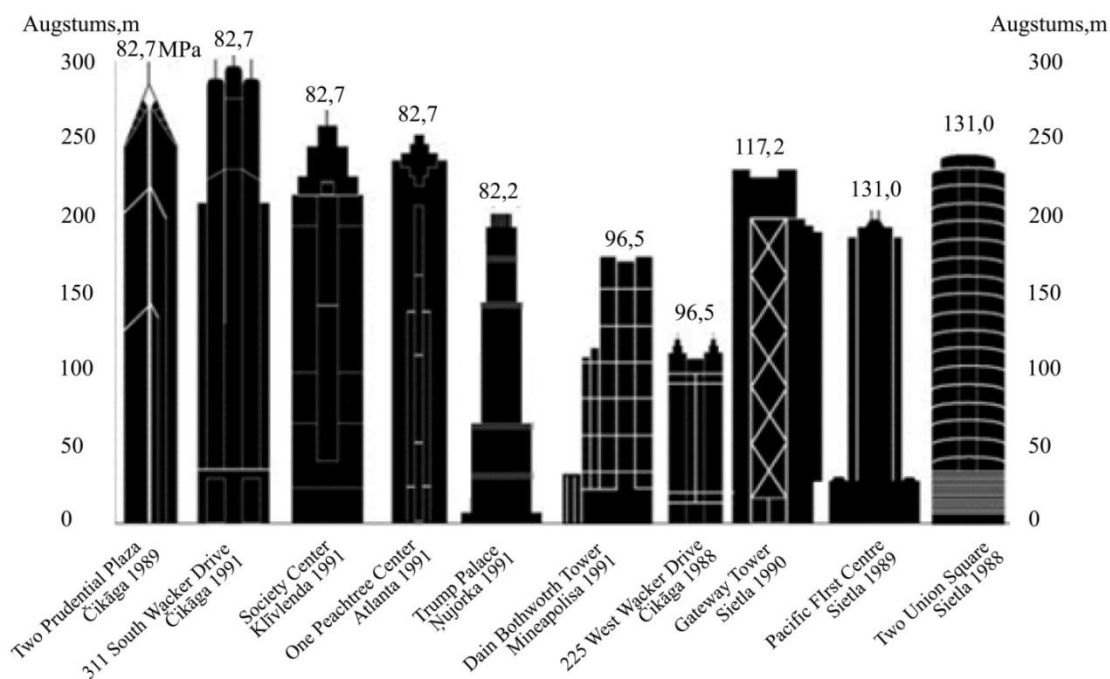
6 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU UN SEVIŠĶI AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU IZMANTOŠANAS JOMAS

Augstas stiprības betonu izmanto, ja ir nepieciešams samazināt konstrukcijas kopējo svaru, vai arī gadījumos, kad arhitektūras risinājums prasa mazāko nesošo elementu daudzumu. Daudzstāvu ēkās augstas stiprības betonu izmantošana palīdz panākt vairāk efektīvu stāvu plānu ar mazāko vertikālo balstu (kolonnu) daudzumu. Arī ir pierādīts, ka augstas stiprības betona izmantošana ir ekonomiski izdevīgāka par parasta betona un tērauda izmantošanu nesošiem elementiem. Veidņu izmantošanai ir liela izmaksas daļa kolonnu būvēšanas procesā; mazāka izmēra kolonnas samazina veidņu daudzumu un rezultātā ļauj ietaupīt [5]. Augstas stiprības betonus sāka izmantot kā tuneļu, tiltu un augstbūvju būvniecības materiālu, kā arī to izmantoja balstiem, daudzstāvu autostāvvietu konstrukcijām, agrokultūras būvēm.

80. gadu beigās un 90. gadu sākumā ASV attīstās augstceltņu vai debesskrāpju būvniecība. 1989.gada ASV Čikāgā bija uzbūvēts 71stāvu debesskrāpis (att.6.1.). Tā bija visaugstākā būve pasaulē, veidota no augstas stiprības betona. Attēlā 6.2. ir parādīti debesskrāpji no augstas stiprības betona, būvēti ASV laika posmā no 1988. gada līdz 1991.gadam. Jau šajā laikā bija izmantots betons ar spiedes stiprību līdz 131 MPa. [5]



att.6.1 1989.gada visaugstākais debesskrāpis pasaulē (ASV; Čikāga) [5]



att.6.2. ASV būvēti debesskrāpji no augstas stiprības betona laika posmā no 1988. līdz 1991. gadam [5]

Sevišķi augstas stiprības betons ir *Hightech*, vai augsti tehnoloģiskais materiāls, ar kuru ir iespējams realizēt īpaši vieglas un filigrānas konstrukcijas. Pagātnē tādas konstrukcijas bija iespējams iegūt tikai ar tērauda izmantošanu. Ar sevišķi augstas stiprības betonu izmantošanu ir ietaupītas izejas materiālu un enerģiju izmaksas, to zemāks pašsvars un augstāka spiedes stiprība ļauj realizēt būves ar vēl lielākiem laidumiem un augstumiem. Betons ir izturīgs pret koroziju, kas ļauj pagarināt visas būves ekspluatācijas laiku un ilgmūžību. Betona ātrāka cietēšana ļauj paātrināt betonēšanas darbus [16].

Sakarā ar zemu porainību sevišķi augstas stiprības betoniem ir augsta spēja pretoties ķīmiskajām un ārējās dabas iedarbēm, tātad tādiem betoniem piemīt laba izturība un necaurlaidība. Tāds būvmateriāls kalpo par alternatīvo tādās būvniecības jomās, kurās ir nepieciešamas augsta stiprība, paaugstināta ūdensnecaurlaidība un ilgmūžība. Sevišķi augstas stiprības betonu galvenās pielietojuma jomas ir:

- augstceltņu būves un tilti,
- šķidrums necaurlaidīgi rezervuāri,
- betons ugunsdrošiem seifiem,
- rūpnieciskas grīdas segumi.

Pirmais projekts ar sevišķi augstas stiprības betonu BPR izmantošanu ir gājēju tilts Kvebekā, Kanādā (Pedestrian/Bikeway Quebec, Canada) (att. 6.3, 6.4). Tilta būvēšanas procesā bija daudz inovāciju, tādu kā tērauda cauruļu, pildītas ar BPR, izmantošana. Nebija izmantota tradicionāla armatūra, kā arī iepriekš izgatavotas un iepriekš saspriegtas betona konstrukcijas. [16]



att.6.3 Gājēju tilts no sevišķi augstas stiprības betona
Kvebeka, Kanādā



att.6.4 Tilta konstrukciju elementi

Pēc Kanādas pieredzes tilti no sevišķi augstas stiprības betona bija būvēti :
Japānā (*Mirai Footbridge, Sakata, Japan*) (att. 6.5; 6.6);



att.6.5 Mirai Footbridge, Sakata, Japan



att.6.6 Mirai Footbridge, Sakata, Japan

Korejā (*Seonyu Footbridge, Seoul, Korea*)(att.6.7; 6.8);



att.6.7 Seonyu Footbridge, Seoul, Korea



att.6.8 Seonyu Footbridge, Seoul, Korea

Francijā (*Flying Carpet, Strasbourg, France*)(att.6.9; 6.10).



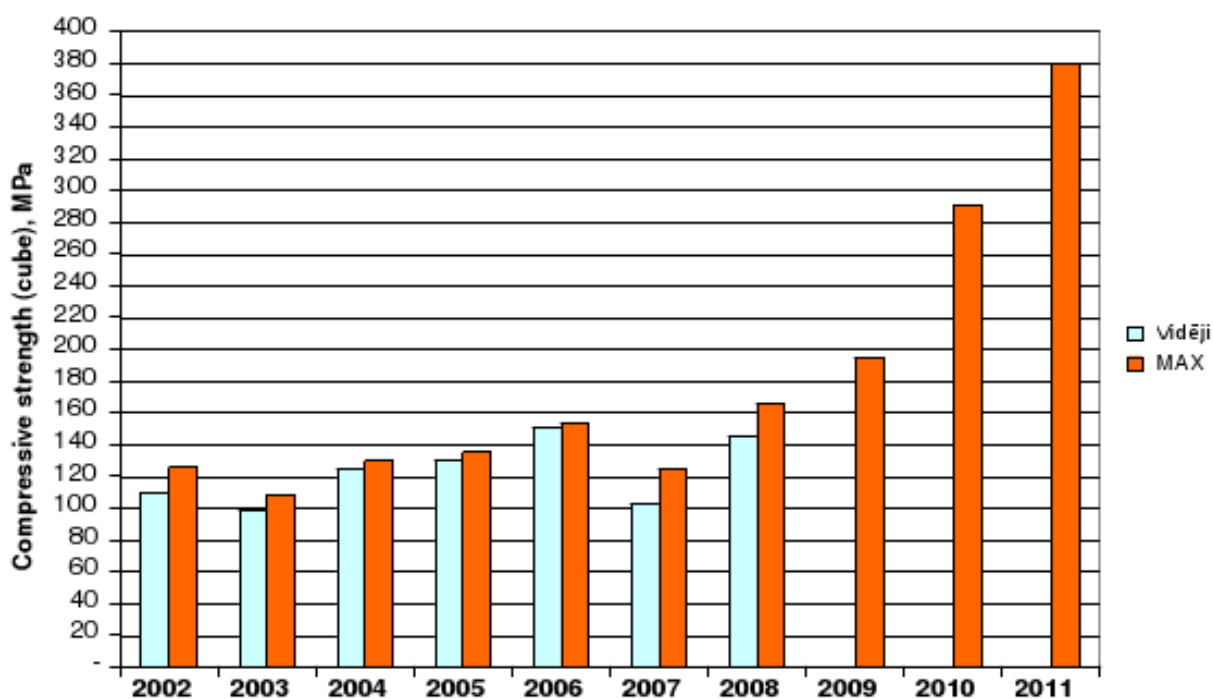
att.6.9 Flying Carpet, Strasbourg, France



att.6.10 Flying Carpet, Strasbourg, France

6.1 Augstas stiprības betonu izmantošanas perspektīvas

Betona ražošanas tehnoloģijas strauji attīstās, uzlabojot betona spiedes stiprību, ilgizturību, spēju pretoties ķīmiskām iedarbēm un citas īpašības. Pēdējo 10 gadu laikā betonu spiedes stiprība pieauga vairākās reizēs, tās attīstību labi atspoguļo Rīgas Tehniskajā Universitātē veiktie pētījumi Latvijas Betona sacensību ietvaros. Tā 2002. gadā maksimāla iegūta spiedes stiprība bija vienāda ar 125.4 MPa. Pieaugot ar katru gadu, 2011. gadā maksimāla spiedes stiprība palielinājās līdz 380.0 MPa. (att. 6.11.)



att.6.11. Latvijas (RTU) Betona sacensību rezultāti

Ir skaidrs, ka betonu attīstība neapstājas. Nākotnē būs iespējams iegūt vēl stiprāko un izturīgāko betonu, izmantojot jaunas paaudzes cementus, inertas un/vai reaktīvas piedevas, kā arī optimizējot betona sastāvu tā, lai iegūtu mazāko Ū/C attiecību un lielāko blīvumu.

Šodien par vienu no perspektīvākiem betona veidiem ir uzskatīts ECC (Engineered Cementitious Composite) betons, kuru vēl sauc par lokano betonu. ECC betonu atklāja inženieru grupa no Mičiganas Universitātes Viktora Li vadībā. Materiāls izskatās kā parastais betons, bet ir 500 reižu izturīgāks pret sabrukumu, par 40% vieglāks un atšķiras no citiem betonu veidiem ar augsto lokanību un elastīgumu (att.6.12.). Pateicoties ilgākam ekspluatācijas periodam, ECC betons ļauj samazināt ekspluatācijas izmaksas. Vēl viena ievērojama priekšrocība ir zemāks enerģijas patēriņš ražošanas procesā, kā arī mazāka ogļskābes gāzes izdalīšana [12].

ECC betons ir stiegrots ar īsām šķiedrām (parasti polimēršķiedras), kuras sastāv apmēram 2% no maisījuma. Pateicoties tām, betonā pie graužošās slodzes veidojas daudz mikroplaisu, nevis lielas plaisas, kā parastam betonam. Tas ļauj ECC betonam izturēt spriegumus un nesabrukt uzreiz. Materiālam ir arī augsta korozijas pretestība; plaisas ir tik mazas, ka stiegrojums nevar būt bojāts no apkārtējās vides negatīvas iedarbes.[11]



att.6.12. ECC betona testēšana [11]

Tabulā 6.1. ir dots ECC betonu īpašību salīdzinājums ar citu veidu betoniem ar stiegrojumu (FRC – Fiber Reinforced Concrete; HPFRCC – High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite) [12]

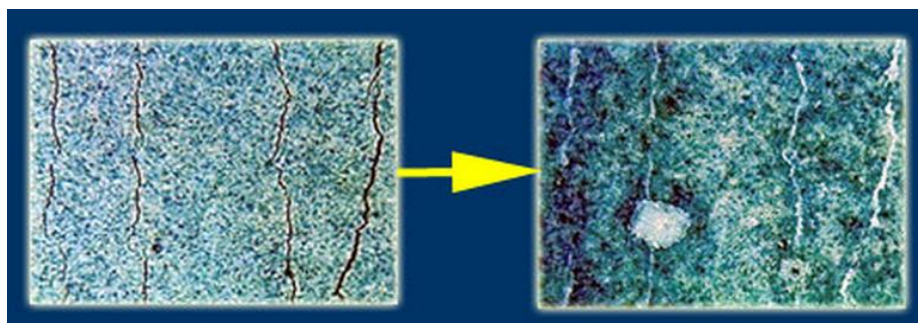
Stiegroto betonu īpašību salīdzinājums

	FRC	HPFRCC	ECC
Šķiedras	Visu veidu šķiedras; <2% no sastāva; Ø 0.5 mm	Pārsvarā tērauda šķiedras; >5% no sastāva; Ø 0.15 mm	Polimēršķiedras; <2% no sastāva; Ø 0.05 mm
Matrica	Rupjas pildvielas	Smalkas pildvielas	Kontrolēta matricas stigrība un plaisu izmērs; smalka smilts
Stiepes deformācijas	0.1%	<1.5%	>3% (parasti); max 8%
Plaisu platums	nav ierobežots	apm.0.1-0.5 mm, pēc stiepes deformācijas >1.5% nav ierobežots	<0.1 mm

ECC betons jau ir pielietots dažādās valstīs, plaši izplatījās Japānā. Pateicoties tādām īpašībām, kā spēja izturēt deformācijas no caurspiešanas un bīdes slodzēm, betons labi strādā zemestrīces laikā un ļauj samazināt bojājumus. Glorio Roppongi Tower (Tokio, Japāna) - 92 m augstā dzīvojamā ēkā sijas no parasta betona bija aizvietotas ar ECC betonu, kas uzlaboja pretestību pret seismiskām slodzēm. [11]

ECC izmanto arī tiltu būvniecībā. 2003. gadā Hokaido (Japāna) bija atvērts 1 km garš Mihara tilts. Būvniecībā bija izmantots apmēram 800 m³ ECC betonu, kas ir par 40% mazāk, ja tilts būtu būvēts no parastas stiprības betona. Mazāk nekā 10 gadu laikā ECC betons bija pielietots dažādos projektos Korejā, Šveicē, Austrālijā un ASV. [11]

Nākotnē ir plānots uzlabot ECC īpašības un padarīt betonu vēl „gudrāku”. Nākamais solis betonu attīstībā ir plaisu pašdzīšana. Ar projektu nodarbojas profesora V.Li grupa, jau ir panākti rezultāti. Attēlā 6.13. ir parādīts betona pašdzīšanas efekts. Baltas nogulsnes plaisu iekšā ir karbonizācijas un hidrotācijas produkts, kas nodrošina betona pašdzīšanu. Tāda betona īpašība samazina remontdarbu izmaksas un pagarina betonkonstrukcijas kalpošanas laiku. [11]



att.6.13. Plaisas betonā pirms un pēc pašdzīšanas [11]

7 AUGSTAS STIPRĪBAS BETONU APRĒĶINA METODIKAS BEZSIJU PĀRSEGUMIEM

Šajā nodaļā tiek apskatītas aprēķina metodikas pēc Eurokodeksa EN 1992-1-1, Šveices normām SIA 262:2003 un amerikāņu normām ACI 318-08. Tiek salīdzinātas caurspiedes aprēķinu metodikas, ko ir svarīgi ņemt vērā bezsiju pārsegumu projektēšanā.

7.1 Bezsiju pārsegumu aprēķina metodika pēc EN 1992-1-1

7.1.1 Aprēķins uz caurspiešanu

Caurspiešanas aprēķina procedūra pamatojas uz pārbaudēm pie kolonnas virsmas un pa galveno kontroles perimetru u_1 . Ja ir nepieciešams šķērsspēku uzņemošais stiegrojums, ir jāatrod tālākais perimetrs $u_{out,ef}$ (att. 7.3.), aiz kura tālāk netiek prasīts šķērsspēku uzņemošais stiegrojums.

Pa kontroles šķēlumam tiek definēti šādi aprēķina bīdes spriegumi (MPa):

- v_{Ed} caurspiešanas spriegums pie kolonnas perimetra vai slogota laukuma perimetra;
- $v_{Rd,c}$ pārseguma plātnes caurspiešanas pretestības aprēķina vērtība bez stiegrojuma pret caurspiešanu apskatāmā kontroles šķēlumā;
- $v_{Rd,cs}$ pārseguma plātnes caurspiešanas pretestības aprēķina vērtība ar stiegrojumu pret caurspiešanu apskatāmā kontroles šķēlumā;
- $v_{Rd,max}$ maksimālā caurspiešanas pretestības aprēķina vērtība apskatāmā kontroles šķēlumā.

Ir jāveic šādas pārbaudes:

- a. maksimālais caurspiešanas spriegums $v_{Ed,max}$ pie kolonnas perimetra vai slogota laukuma perimetra nedrīkst pārsniegt maksimālo caurspiešanas pretestību:

$$v_{Ed,max} < v_{Rd,max} \quad (7.1.)$$

- b. nav nepieciešams stiegrojums pret caurspiešanu, ja:

$$v_{Ed} < v_{Rd,c} \quad (7.2.)$$

- c. ja apskatāmajā kontroles šķēlumā v_{Ed} pārsniedz vērtību $v_{Rd,c}$ ir jānodrošina stiegrojums pret caurspiešanu saskaņā ar [34] 6.4.5. apakšpunktu.

7.1.2 Plātnes pārbaude uz caurspiešanu

Jāpārbauda vai izpildās nosacījums:

$$v_{Ed,max} < v_{Rd,max}; \quad (7.1)$$

Caurspiešanas pretestība $v_{Ed,max}$ ir ierobežota:

$$v_{Ed,max} = \frac{\beta v_{Ed}}{u_o d} \leq v_{Rd,max}; \quad (7.3)$$

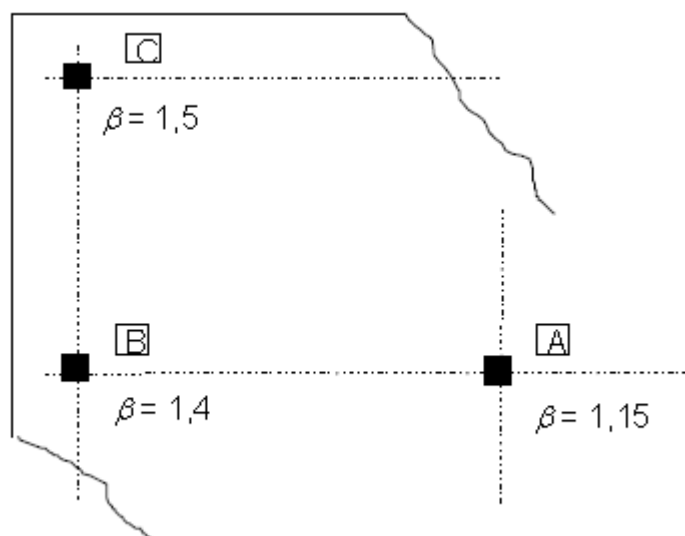
kur: u_o kolonnas perimetra garums;

d plātnes darbīgais augstums;

β koeficients, kuru iegūst no izteiksmēm vai pieņem (att.7.1.)

Konstrukcijām, kurām sāniskā stabilitāte nav atkarīga no momentu pārneses starp pārseguma plātnēm un kolonnām, un kurām blakus laidumu garumi neatšķiras vairāk kā par 25 %, var izmantot β tuvinātas vērtības.

PIEZĪME. Valstī lietojamo vērtību var atrast tās Nacionālajā Pielikumā. Rekomendējamās vērtības ir dotas attēlā.



att.7.1. Koeficienta β tuvinātas vērtības atkarībā no kolonu atrāšanas vietas [34]

Valstī lietojamo $v_{Rd,max}$ vērtību var atrast tās Nacionālajā Pielikumā. Rekomendējamā vērtība ir $0.5 v f_{cd}$. ([34], punkts 6.4.5)

Tāpēc:

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max} = 0.5 v_{fd}, \quad (7.4)$$

kur: v stiprības samazinājuma faktors betonam, kas saplaisā pie bīdes.

PIEZĪME. Valstī lietojamo v vērtību var atrast tās Nacionālajā Pielikumā. Rekomendējamā vērtība izriet no izteiksmes:

$$v = 0.6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right], \text{ (kur } f_{ck} \text{ dots MPa) ([34], punkts 6.4.5)} \quad (7.5)$$

Gadījumā, ja nosacījums neizpildās un $v_{Ed,max} > v_{Rd,max}$, ir nepieciešams izmainīt plātnes dimensijas.

7.1.3 Stiegrojuma pret caurspiešanu nepieciešamība

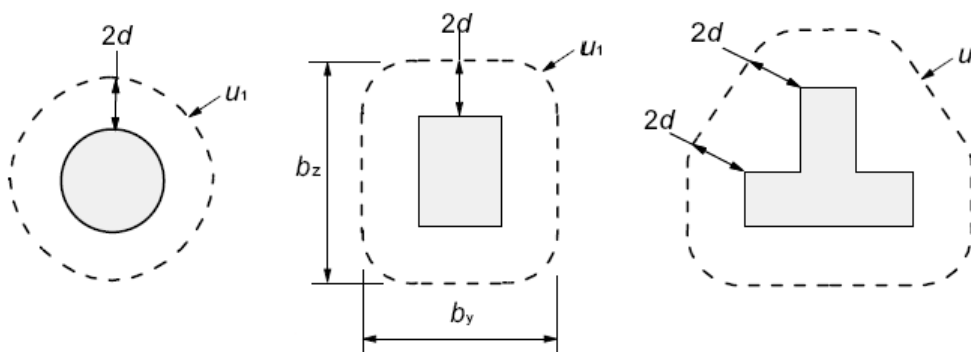
Jāpārbauda vai izpildās nosacījums:

$$v_{Ed} < v_{Rd,c} \quad (7.2)$$

Maksimālo caurspiešanas spriegumu pie slogota laukuma perimetra v_{Ed} aprēķinu pēc (7.6) formulas:

$$v_{Ed} = \beta V_{Ed} / u_1 d, \quad (7.6)$$

kur: u_1 apskatāmais kontroles perimetra garums, tiek atrasts kā $2,0d$ (d - konstants pārseguma plātnes efektīvais biezums) attālumā no slodzes laukuma un tam jābūt tā izveidotam, lai tiktu minimizēts tā garums (att.7.2.)



att.7.2. Kontroles perimetra garums [34]

Pārseguma plātnes caurspiešanas pretestība jānovērtē galvenajam kontroles šķēlumam saskaņā ar [34] 6.4.2. apakšpunktu. Aprēķina caurspiešanas pretestību (MPa) var izrēķināt pēc formulas (7.7)

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 p_1 f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}), \quad (7.7)$$

kur f_{ck} dots MPa;

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0; \quad d \text{ (mm)}; \quad (7.8)$$

p_{ly}, p_{lz} attiecas uz stieptu attiecīgi y - un z - virzienos saistītu stiegrojumu. p_{ly} un p_{lz} vērtības jāaprēķina kā vidējās vērtības, ņemot vērā pārseguma plātnes platumu, kas ir vienāds ar kolonnas platumu plus katras malas $3d$;

$$\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2 \quad (7.9)$$

PIEZĪME. Valstī lietojamajās $C_{Rd,c}$, v_{min} un k_1 vērtības var atrast tas Nacionālajā Pielikumā. Rekomendējamās vērtības ir: $C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$, v_{min} ir dots ar izteiksmi (6.3N), bet $k_1 = 0.1$. ([34], 6.4.4)

Ja nosacījums neizpildās un $v_{Ed} > v_{Rd,c}$, tad ir nepieciešams stiegrojums pret caurspiešanu.

7.1.4 Nepieciešamā stiegrojuma daudzuma un kontroles perimetra noteikšana

Nepieciešams noteikt kontroles perimetru u_{out} (vai $u_{out,eff}$ (att.8.3.)), kuram vairāk netiek prasīts stiegrojums pret caurspiešanu:

$$u_{out,eff} = \frac{\beta v_{Ed}}{v_{Rd,c} d}. \quad (7.10)$$

Vistālākais stiegrojuma pret caurspiešanu perimetrs jānovieto attālumā, kas nav lielāks par $k d u_{out}$ (vai $u_{out,eff}$)

PIEZĪME. Valstī lietojamo k vērtību var atrast tas Nacionālajā Pielikuma. Rekomendējamā vērtība ir 1,5

Ja tiek prasīts stiegrojums pret caurspiešanu, tas jāaprēķina saskaņā ar izteiksmi

$$v_{Rd,cs} = 0.75v_{Rd,c} + 1.5 \left(\frac{d}{s_r} \right) A_{sw} f_{ywd,ef} \left(\frac{1}{u_1 d} \right) \sin \alpha, \quad (7.11)$$

kur: A_{sw} stiegrojuma pret caurspiešanu apkārt kolonnai viena perimetra laukums (mm^2);

s_r stiegrojuma pret caurspiešanu perimetru radiālais solis [mm];

$f_{ywd,ef}$ stiegrojuma pret caurspiešanu efektīvā aprēķina stiprība saskaņā ar izteiksmi:

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0.25d < f_{ywd} \text{ (MPa)} \quad (7.12)$$

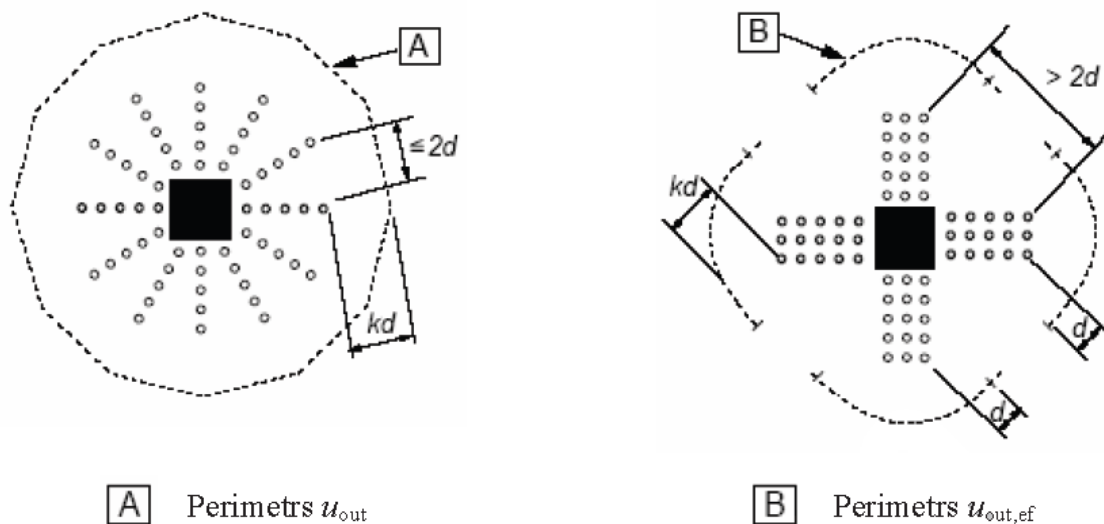
d efektīvo augstumu ortogonālā virzienā vidējais (mm);

α leņķis starp stiegrojumu pret caurspiešanu un pārseguma plātnes plakni.

Ja ir nodrošināta viena uz leju noliekta stiegru līnija, tad izteiksmē (7.11) attiecību $\frac{d}{s_r}$ var pieņemt vienādu ar 0,67.

No izteiksmes (7.11) ieguvām nepieciešamo stiegru daudzumu uz vienu perimetru:

$$A_{sw} = \frac{u_1 s_r (v_{Ed} - 0.75 v_{Rd,c})}{1.5 f_{ywd,ef}} \quad (7.13)$$



A Perimeters u_{out}

B Perimeters $u_{out,ef}$

att.7.3. Kontroles perimetrs u_{out} un $u_{out,eff}$,

kuram vairāk netiek prasīts stiegrojums pret caurspiešanu [34]

7.2 Bezsiju pārsegumu aprēķina metodika pēc SIA 262:2003

7.2.1 Aprēķins uz caurspiešanu

Pēc SIA 262:2003 slogota laukuma (plātnei vai fundamentam) caurspiešanas pretestība v_{Rd} nedrīkst būt mazāka par caurspiešanas spriegumu no šķērsspēka v_d :

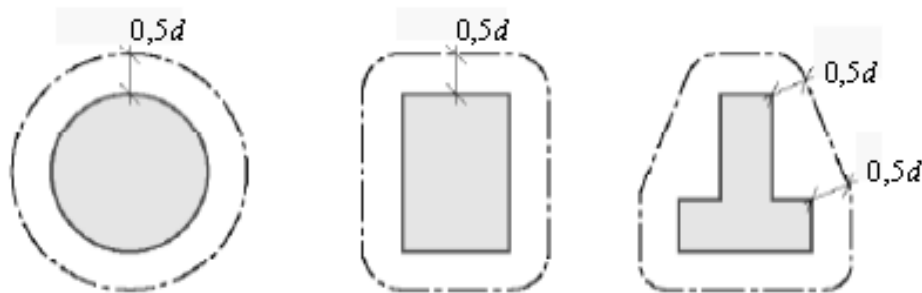
$$v_d \leq v_{Rd} \quad (7.15)$$

Spriegumu no šķērsspēka v_d atrod pēc formulas (7.16) :

$$v_d = \frac{V_d}{u}, \quad (7.16)$$

kur: V_d šķērsspēka aprēķina vērtība,

u kontroles perimetra garums, kas atrodas $d/2$ attālumā no kolonnas malām (att.7.6.)



att.7.6. Kontroles perimetra garums, kas atrodas $d/2$ attālumā no kolonnas malām [16]

Caurspiešanas pretestības aprēķina vērtību atrod pēc formulas (7.17):

$$v_{Rd} = k_r \tau_{cd} d, \quad (7.17)$$

kur: τ_{cd} bīdes sprieguma robeža :

$$\tau_{cd} = \frac{0.3}{\gamma_c} \sqrt{f_{ck}}; \quad (7.18)$$

d vidējais efektīvais pārseguma plātnes biezums, kuru var pieņemt kā $d_y + d_z/2$,

kur: d_y, d_z ir efektīvie augstumi kontroles šķēluma y- un z- virzienos;

k_r deformāciju koeficients:

$$k_r = \frac{1}{0.45 + 0.9r_y} \geq \frac{1}{1 + 2.2d}; \quad (d \text{ (m)}) \quad (7.19)$$

PIEZĪME. Ja ir izmantots betons ar graudu izmēru $D_{max} < 32 \text{ mm}$, vienādojumā (7.19) r_y vērtība jāreizina ar koeficientu $48 / (D_{max} + 16)$. Viegliem betoniem $D_{max} = 0$.

Zonas, kuras atrodas iespējama lūzuma stāvoklī, lielums r_y ir atkarīgs no slodzes, lieces pretestības un plātnes izmēriem. Bezsiņu pārsegumiem ar regulāro kolonnu izvietojumu ir rekomendēta sekojoša r_y vērtība:

$$r_y = 0.15l \left(\frac{m_{0d}}{m_{Rd}} \right)^{\frac{1}{8}}; \quad (l(m)) \quad (7.20)$$

kur l laidums starp balstiem (kolonnām);

m_{0d} salīdzinājuma moments;

m_{Rd} aprēķina lieces moments apskatāmajā zonā.

PIEZĪME. Ja lieces pretestības vērtība un laidumu garumi atšķiras x un y virzienos, tad r_y vērtību ir nepieciešams noteikt katram virzienam atsevišķi un izmantot vislielāko no tām.

Ja caurspiešanas spriegums v_d pārkāpj caurspiešanas pretestību v_{Rd} , tad paaugstināt caurspiešanas pretestību ir iespējams ar plātnes biezuma palielināšanu vai izmantojot stiegrojumu pret caurspiešanu.

7.2.2 Nepieciešamā stiegrojuma daudzuma noteikšana

Lai izvairītos no betona lūzuma kolonnas zonā, caurspiešanas pretestību ierobežo ar:

$$v_{Rd} = 2k_r \tau_{cd} d. \quad (7.21)$$

Jāatceras par to, ka caurspiešanas pretestību ar stiegrojumu no vienādojuma (7.17) nedrīkst salīdzināt ar caurspiešanas pretestību bez stiegrojuma no vienādojuma (7.21). Pie tādas pašas lieces pretestības koeficients k_r būs mazāks, jo m_{0d} un kā secība r_y koeficienta vērtība palielināsies.

Ar vertikālo stiegrojumu caurspiešanas pretestības vērtība ir vienāda ar:

$$v_{Rd} = \frac{A_{sw} f_{sd} d}{us}; \quad (7.22)$$

No kurienes stiegrojuma šķērsgriezuma laukums viena rindā A_{sw} ir:

$$A_{sw} = \frac{us v_{Rd}}{f_{sd} d}; \quad (7.23)$$

kur: f_{sd} stiegrojuma aprēķina pretestība (MPa)

s solis starp stiegrojuma rindām.

$$\text{Pirmā stieģrojuma rinda atrodas attālumā: } 0.3d < s < 0.75d \quad (7.24)$$

7.3 Bezsiju pārsegumu aprēķina metodika pēc ACI 318-08

7.3.1 Aprēķins uz caurspiešanu

Pēc ACI 318-08 tiek salīdzināti caurspiešanas spriegums v_u ar caurspiešanas pretestības aprēķina vērtību v_n pēc formulas (7.25):

$$v_u \leq \varphi v_c, \quad (7.25)$$

kur: φ samazinājuma koeficients ($\varphi = 0.75$ caurspiešanai)

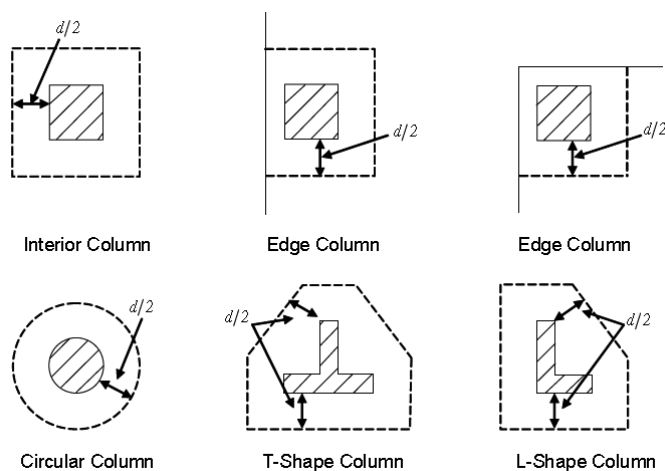
Caurspiešanas spriegumu v_u atrod pēc formulas (8.26):

$$v_u = \frac{V_u}{b_o d}, \quad (7.26)$$

kur: V_u iedarbojošs šķērsspēks;

d efektīvais pārseguma plātnes augstums;

b_o kontroles perimetra garums, kas atrodas $d/2$ attālumā no kolonnas malām (att.7.9.)



att.7.9. Kontroles perimetra garums, kas atrodas $d/2$ attālumā no kolonnas malām [1]

Pie ekscentriskas slodzes caurspiešanas spriegumu definē kā:

$$v_u = \frac{V_u}{b_o d} + \frac{\gamma_V M_u e_{1,0}}{J}, \quad (7.27)$$

kur: $M_u = M_o + V_u e_{1,0}$,

kur: M_u moments, kas iet caur galvenās kontroles apgabala smaguma centru;

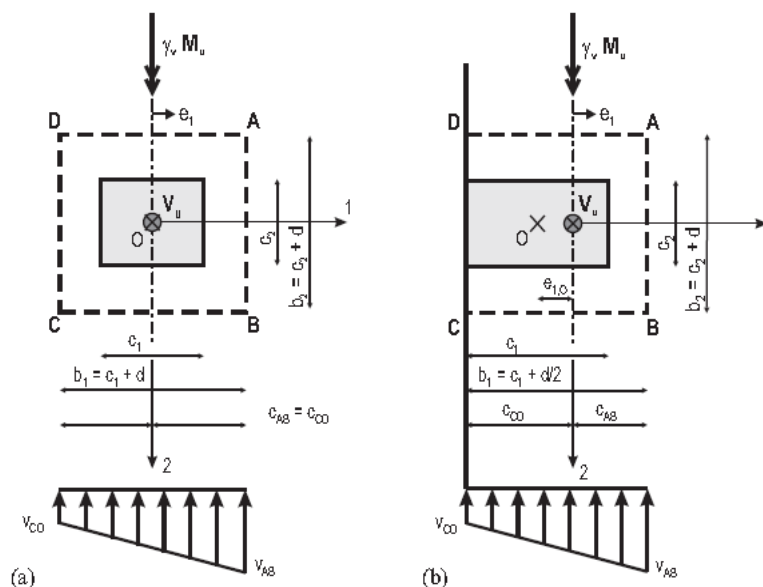
M_o moments, kas iet caur kolonnas smaguma centru O ;

$e_{1,0}$ attālums starp galvenās kontroles apgabala smaguma centru un kolonnas smaguma centru (att.8.10. $e_{1,0} = 0$, un $e_{1,0}$ ir ar negatīvo zīmi);

- e_1 attālums starp kolonnas smaguma centru un punktu, kur ir noteikts bīdes spriegums;
- J polāro inerces momentu analogs priekš galvenās kontroles perimetra apgabala;
- γ_v momenta daļa, kas rāda caurspiešanas spriegumu:

$$\gamma_v = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \sqrt{b_1/b_2}} \quad (7.28)$$

kur: b_1, b_2 galvenās kontroles perimetra garumi, perpendikulāri un paralēli momenta rotācijas asij (att.8.10.)



att. 7.10. Spriegumu sadalīšana un kritiskais perimetrs vidējai un malējai kolonnai pie neekscetriski (a) un ekscentriski (b) pieliktas slodzes pēc ACI 318-08 [1]

Caurspiešanas pretestības aprēķina vērtību gar galvenās kontroles perimetru v_c atrod pēc formulas (7.29):

$$v_c = \min \begin{cases} \left(2 + \frac{4}{\beta_c}\right) \sqrt{f_c'} b_0 d \\ \left(\frac{a_s d}{b_0} + 2\right) \sqrt{f_c'} b_0 d \\ 4 \sqrt{f_c'} b_0 d \end{cases} \quad (US); \quad v_c = \min \begin{cases} 0.17 \left(2 + \frac{4}{\beta_c}\right) \sqrt{f_c'} b_0 d \\ 0.083 \left(\frac{a_s d}{b_0} + 2\right) \sqrt{f_c'} b_0 d \\ 0.33 \sqrt{f_c'} b_0 d \end{cases} \quad (SI); \quad (7.29)$$

- kur: f_c' betona cilindriska spiedes stiprība (cilindra $\varnothing = 150\text{mm}$, $h=300\text{mm}$); $\sqrt{f_c'} \leq 100$
- β_c kolonnas garākas malas attiecība pret īsāko mālu;
- a_s koeficients, atkarīgs no kolonnas atrāšanas vietas:

- iekšējām kolonnām: 40;

- mājējām kolonnām: 30;
- stūra kolonnām: 20.

Jāpārbauda sekojoši nosacījumi:

• ja $v_u \leq \varphi v_c \Rightarrow$ stiegrojums pret caurspiešanu nav vajadzīgs; (7.25)

• ja $v_u > \varphi v_{u,max} \Rightarrow$ jāizmaina plātnes dimensijas; (7.30)

• ja $\varphi v_{max} > v_u > \varphi v_c \Rightarrow$ ir vajadzīgs stiegrojums pret caurspiešanu. (7.31)

Maksimālais caurspiešanas spriegums $v_{u,max}$ ir definēts kā:

$$v_{u,max} = 6\sqrt{f_c} \text{ (US); } 0.5\sqrt{f_c} \text{ (SI) (saitēm);} \quad (7.32)$$

$$v_{u,max} = 8\sqrt{f_c} \text{ (US); } 0.66\sqrt{f_c} \text{ (SI) (vert. stiegrām).} \quad (7.33)$$

7.3.2 Nepieciešamā stiegrojuma daudzuma noteikšana

Plātnēm ar stiegrojumu pret caurspiešanu caurspiešanas pretestības aprēķina vērtība v_c ir definēta kā :

$$v_c = v_{cs} + v_s \leq v_{max}; \quad (7.34)$$

kur: v_{cs} betona nestspēja zonā ar stiegrojumu pret caurspiešanu;

v_s stiegrojuma nestspēja;

v_{max} maksimālais caurspiešanas spriegums.

Betona nestspēju zonā ar stiegrojumu pret caurspiešanu v_{cs} atrod pēc formulām (7.35) un (7.36):

$$v_{cs} = 2\sqrt{f_c} \text{ (US); } 0.17\sqrt{f_c} \text{ (SI) (aptverēm);} \quad (7.35)$$

$$v_{cs} = 3\sqrt{f_c} b_0 d; \text{ (US); } 0.25\sqrt{f_c} \text{ (SI) (vert. stiegrām).} \quad (7.36)$$

Stiegrojuma nestspēja v_s definētā kā:

$$v_s = \frac{A_v f_{yt}}{b_0 s}, \quad (7.37)$$

kur: A_v stiegrojuma šķērsriezuma laukums;

s attālums starp stiegrām ($s \leq 0.5d$ – aptverēm, $s \leq 0.75d$ – vert. stiegrām);

f_{yt} stiegrojuma aprēķina pretestība.

Nepieciešamo stiegrojuma daudzumu uz vienu rindu atrod pēc formulas (7.38) :

$$\frac{A_v}{s} = \frac{(v_u - \varphi v_{cs})}{\varphi f_{yt} d \sin \alpha}; \quad (7.38)$$

kur: s attālums no kolonnas malas līdz kritiskajam perimetram ($d/2$);

α leņķis starp stiegrojumu pret caurspiešanu un plātņi;

f_{yt} stiegrojuma aprēķina pretestība.

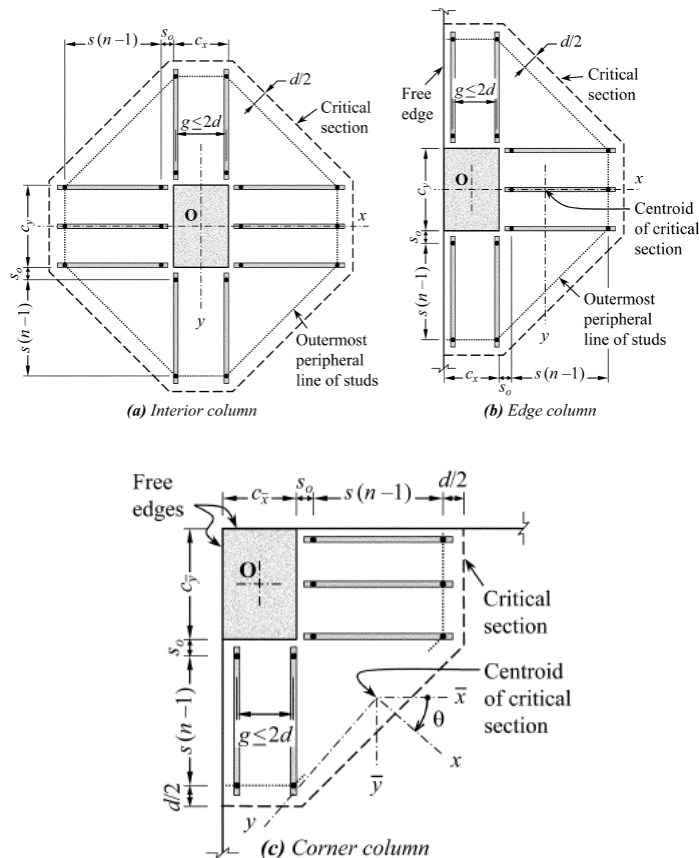
Nepieciešamais stiegrojuma daudzums nedrīkst būt mazāk par minimālo:

$$A_v \geq A_{v,min} \quad (7.39)$$

Minimālo stiegrojuma daudzumu atrod pēc formulas(7.40):

$$A_{v,min} = \frac{2\sqrt{f_c}}{f_{yt}} \quad (7.40)$$

Pēc ACI 318-08 stiegrojums pret caurspiešanu jānovieto perpendikulāros virzienos, t.i., paralēlās līnijās pret kolonu malām (att. 7.11.).



att. 7.11 Tradicionāls stiegrojuma izvietojums iekšējām, māļējām un stūra kolonnām [1]

Stiegru visefektīvākā novietošana ir kolonu stūros, tur, kur ir caurspiešanas sprieguma vislielākā koncentrācija. Minimālais rindu skaits ir 4, 6 un 8 iekšējām, mālējām un stūra kolonnām attiecīgi.

LITERATŪRA

1. American Concrete Institute „Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary”, 2008. – 462 lpp.
2. Caldarone M.A. High-Strength Concrete A Practical Guide. – New York: Taylor & Francis, 2009. –
3. Fly Ash Bricks: High-Strength Concrete/ Internets. – <http://flyashbricksinfo.com/construction/high-strength-concrete.html>, (17.11.2011)
4. Harris D. K. Characterization of punching shear capacity of thin UHPC plates. – Virginia, Blacksburg, 2004. – p. 131
5. How to design concrete structures using Eurocode 2 / Bond J., Brooker O., Harris J., (eds) – London: The Concrete Centre, 2006. – 104 lpp.
6. Joost Walraven. Limited State Design And Verification/ Internets. – http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/1110_WS_EC2/Presentations/04_EC2WS_Walraven_ULSSLS, (25.11.2011)
7. Korjakins A., Šahmenko G., Būmanis Ģ. Bore-silicate glass waste of lamp as a micro-filler for concrete. – Rīga: RTU, 2009. – p.9
8. Mosley B., Bungey J., Hulse R. Reinforced Concrete Design to Eurocode 2, Sixth edition. – London: Palgrave Macmillan, 2007. – 408 lpp.
9. Punching shear stress check and reinforcement design based on ACI code/ Internets. – <http://www.scribd.com/doc/36838507/Punching-Shear-ACI-Code>, (02.12.2011)
10. Lecture 24 - Design of Two-Way Floor Slab System/ Internets. – <http://www.docstoc.com/docs/53825812/Lecture-24---Design-of-Two-Way-Floor-Slab-System>, (09.01.2012)
11. University of Michigan: Concrete Ideas for a Sustainable Future/ Internets. –
12. <http://ace-mrl.engin.umich.edu/>, (25.05.2012)
13. Wikipedia: Engineered cementitious composite/ Internets. – http://en.wikipedia.org/wiki/Engineered_cementitious_composite, (25.05.2012)
14. Alonso M.T. Hochfester Beton // Betontechnische Berichte. – Dusseldorf, 2010. – S. 157 – 168 / Internets. – http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Betontechnische_Berichte/157-168_Hochfester_Beton.pdf, (14.10.2011)
15. Bemessung von Flachdecken und Fundamentplatten gegen Durchstanzen mit dem FIDECA-Rechenprogramm auf der Basis der neuen SIA-Normen von 2003/ Internets.-

<http://www.fischer-rista.ch/ /frontend/handler/document.php?id=250&type=42>,

(15.10.2012)

16. Betonbau.Einführung in die Norm SIA 262.Durchstanzen/ Internets. - <http://ibeton.epfl.ch/Publications/2003/Muttoni03f.pdf>, (15.10.2012)
17. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Sachstandsbericht, Ultrahochfester Beton/ Schmidt M., Bunje M., Dehn F. u.a. – Berlin:Beuth,2008. –
18. DIN EN 206-1 Norm.Beton-Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformitt. – Berlin:Beuth Verlag, 2001.
19. DIN 1045-2 Norm.Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton –Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformitt; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. – Berlin:Beuth Verlag, 2001.
20. Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC) Forschungsbericht DFG FE 497/1-1/ Fehling E., Schmidt M., Teichmann T.u.a. – Kassel: Kassel University Press GmbH, 2005. –
21. Fehling E.,Leutbecher T. Ultrahochfester Beton – Bemessungsgrundlagen und Anwendungsmöglichkeiten//Braunschweiger Bauseminar 2004 „Qualität im Bauwesen“, Heft 181. – Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 2004. – S.93 - 102
22. Feldrappe V., Müller Ch. Auswirkungen einer Frostbeanspruchung auf dichte hochfeste Betone //Beton 54 – 2004. – Nr. 10. – S. 513 – 515 und Nr. 11. – S. 575 – 579
23. Heidelberg Cement: Betontechnologische Kennwerte von Gesteinskörnungen, Kornzussamensetzung – Sieblinien / Internets. –
24. http://beton-technische-daten.de/2/2_7.htm, (05.11.2012)
25. Norm SIA 262:2003 „Betonbau“, 2003. – 89 lpp.
26. Richter T. Hochfester Beton /Hochleistungsbeton// Zement-Merkblatt Betontechnik – 2002. – Nr. B16. – 1.–6. lpp.
27. Schmidt M., Bornemann R. Möglichkeit und Grenzen von Hoch- und Ultra-Hochfestem Beton. – Weimar: Ibausil, 2000. – 10 lpp.
28. Schmidt M., Fehling E., Teichmann T. u. a. Ultra-Hochleistungsbeton: Neue Deminsion im Betonbau// VDI Jahrbuch 2003 – Bautechnik 15.Jahrgang. – Düsseldorf: VDI Gesellschaft Bautechnik, 2003. – S.53-77
30. Зайцев И. Н. Высокопрочный бетон// СтройПРОФИЛЬ – 2007. – Nr.8. / Internets. –
31. <http://stroyprofile.com/archive/2893>, (24.09.2011)
32. Инженерные конструкции / В.Н.Голосов, В.В.Ермолов, Н.В. Лебедева и др. – Москва, Высшая школа, 1991. – 408с.

33. Ковлер К., Йенсен О.М., Фаликман В. Как сделать хороший бетон еще лучше?// Технологии бетонов – 2005. - №.1. / Internets. - <http://www.masterbetonov.ru/content/view/535/239/>, (12.05.2012)
34. LVS EN 1992-1-1:2005 – Betona konstrukciju projektēšana / Internets. – www.ortus.lv, (12.03.2012)
35. Rumko V. „Augstas stiprības betonu aprēķina īpatnības.” Rīga, 2013.