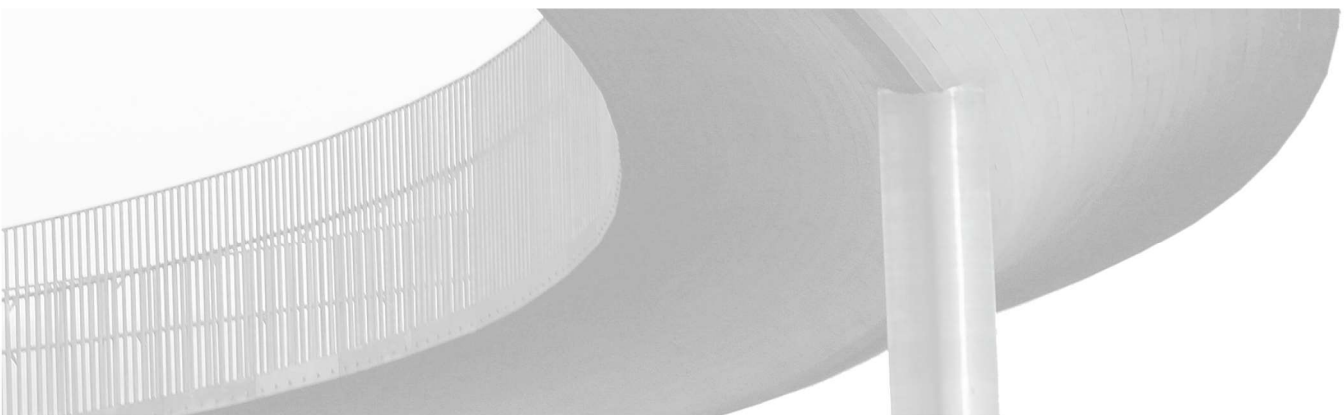




STYRKINGARMÖGULEIKAR BURÐARLAGS Í VEGUM

Áfangaskýrsla fyrir árið 2016

23.06.2017



SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

SKJALALYKILL

2970-205-SKY-001-V03

SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

VERKEFNISSTJÓRI – FULLTRÚI VERKKAUPA

Jón Magnússon

VERKEFNISSTJÓRI – EFLA

Þorbjörg Sævarsdóttir

LYKILORÐ

TITILL SKÝRSLU

Styrkingarmöguleikar burðarlags í vegum

VERKHEITI

Styrkingarmöguleikar burðarlags í vegum

VERKKAUPI

Vegagerðin, EFLA

HÖFUNDUR

Þorbjörg Sævarsdóttir (EFLA), Jón Magnússon (Vegagerðin) & Bergþóra Kristinsdóttir (EFLA)

ÚTDRÁTTUR

STAÐA SKÝRSLU

- Í vinnslu
- Drög til yfirlstrar
- Lokið

DREIFING

- Opin
- Dreifing með leyfi verkkaupa
- Trúnaðarmál

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður skýrslna ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

HÖFUNDAR	DAGS.	RÝNT	DAGS.	SAMÞYKKT	DAGS.
Þorbjörg Sævarsdóttir, Jón Magnússon & Bergþóra Kristinsdóttir	31.03.16	Höfundar	31.03.16	ÁFANGASKÝRSLA 2015	31.03.16
Þorbjörg Sævarsdóttir, Jón Magnússon & Bergþóra Kristinsdóttir	01.02.17	Höfundar	01.02.17	ÁFANGASKÝRSLA 2016 DRÖG	01.02.17
Þorbjörg Sævarsdóttir, Jón Magnússon & Bergþóra Kristinsdóttir	23.06.17	Þorbjörg Sævarsdóttir	23.06.17	Þorbjörg Sævarsdóttir	23.06.17

EFNISYFIRLIT

1	INNGANGUR	9
2	STYRKINGAR OG ENDURBÆTUR	10
2.1	Noregur	11
2.1.1	Val styrkingaraðferða	14
2.1.2	Bikbundið burðarlag	15
2.1.3	Sementsbundið burðarlag	17
2.2	Bretland	19
2.3	Nýja Sjáland	22
2.4	Portland sement	23
2.4.1	Eiginleikar sementsbundins burðarlags (CTB)	23
2.4.2	Hönnun sementsbundins burðarlags	25
2.4.3	Framkvæmd sementsbundins burðarlags	26
3	FESTUN Á ÍSLANDI	28
3.1	Sementsfestun	29
3.1.1	Framkvæmd sementsfestunnar	30
3.2	Bikfestun	31
3.2.1	Framkvæmd bikfestunnar	33
4	ATHUGUNARSTAÐIR	35
4.1	Sementsstyrking í Borgarfirði	36
4.1.1	Sementsbundnir kjarnar	37
4.1.2	Falllóðsmælingar	38
4.2	Óbundinn endurbæting Skálholtsvegur	39
4.3	Bikbundið burðarlag í Biskupstungnabraut	40
4.4	Sementsfestun á Barðastrandavegi hautið 2016	42
4.5	Prófun á bikfestun – Ólafsfjarðarvegur	43
4.5.1	Falllóðsmælingar	45
4.6	Sementsfestun á Norðurlandi, vegir 1-k6, 1-k7 og 1-p3/4	46
5	FALLLÓÐSMÆLINGAR	48
5.1	Sementsfestir vegir (sementsbundið burðarlag)	50
5.2	Bikbundnir vegir (bikfest burðarlag)	52
5.3	Vegir sem er keyrt í án frekari styrkingar eða endurbyggðir að hluta	54
6	SAMANTEKT	56
7	LOKAORÐ	64
HEIMILDIR		66

MYNDASKRÁ

Mynd 1: Almennur líftími slitlags (ár) fyrir ólíkar gerðir slitlags og mismunadi árdagssumferð (ÁDT) (Statens Vegsesen, 2014a).	12
Mynd 2: Styrkingarpörf (F_{diff}) vegna óvenju lágs líftíma slitlags (Statens Vegsesen, 2014a).	13
Mynd 3: Kröfur til burðarlagsgildis eftir styrkingu (Statens Vegsesen, 2014a).	13
Mynd 4: Skematísk mynd af ákvarðanarferli og hönnun styrkingar í vegi (Statens Vegsesen, 2015).	14
Mynd 5: notkunarmöguleikar efna í burðarlög (Statens Vegsesen, 2014a).	18
Mynd 6: Flæðirit af svæðismati eða könnun á staðháttum þegar vegur þarfnast endurbóta.	20
Mynd 7: Flæðirit sem hjálpar til við ákvörðun á bindiefni.	21
Mynd 8: Samanburður á niðurbeygjum og hjólfaramyndun í vegi með óbundið og sementsbundið burðarlag (Halsted o.fl., 2006)	24
Mynd 9: Spennudreifing óbundins og bundins burðarlags (Halsted o.fl., 2006).	24
Mynd 10: Kornadreifing fyrir lágmarks sements innihald (Halsted o.fl., 2006).	25
Mynd 11: Marklínur fyrir sementsfest burðarlög (Vegagerðin, 2017).	30
Mynd 12: Þurrfræsing er fyrsta skref sementsfestunnar	30
Mynd 13: Blöndun sements við steinefnið.	31
Mynd 14: Heflun efnisins um leið og blöndun þess er lokið	31
Mynd 15: Markalínur steinefnis (leiðbeinandi) fyrir froðumalbik og bikþeytu blandað í námu (Vegagerðin,2017).	33
Mynd 16: Framkvæmd bikfestunnar í Noregi (Refsdal, 2007)	34
Mynd 17: Sementsfestun burðarlags í Borgarfirði	36
Mynd 18: Viðmiðunarkornakúrfa Vegagerðarinnar ásamt kornakúrfum fengnum við Gljúfurá og Munaðarnesland	36
Mynd 19: Kjarni úr sementsfestun í Borgarfirði	38
Mynd 20: Skálhotsvegur eftir að núverandi vegur var þurrfræstur.	39
Mynd 21: Viðmiðunarkornakúrfa Vegagerðarinnar ásamt kornakúrfum Skálholtsvegur og Merkurlautar.	40
Mynd 22: Við kjarnatöku á Biskupstungnabraut	41
Mynd 23: Prófun kjarna á NMÍ úr Biskupstungnabraut.	41
Mynd 24: Sementsfestun við Patreksfjörð sumarið/haustið 2016	42
Mynd 25: Tilranakaflar, staðsetning, gerð og frávík, númer sýna af bikblöndu (Þórir Ingason, 2004).	44
Mynd 26: Kornastærðardreifing sýna eftir fræsun og blöndun með biki sem og markalínur fyrir efra burðarlag og efri markalínur fyrir froðumalbik og þeytumalbik (þma), skv. ALVERK 95 (Þórir Ingason, 2004).	44
Mynd 27: Niðurstöður falllódsmælinga árána 1996 og 1998 áður en burðarlagið var bikbundið á árána 2001, 2002, 2003, 2005, 2009 og 2014 eftir bindingu burðarlagsins.	46
Mynd 28: Niðurstöður falllódsmælinga ársins 2006 áður en burðarlagið var sementsbundið og árána 2011 og 2013 eftir bindingu burðarlagsins.	47
Mynd 29: Falllódstæki Vegagerðarinnar (Helga Þórunn Gunnlaugsdóttir, 2008).	48
Mynd 30: Einfölduð uppsetning falllóðs og nema, D_0 er niðurbeygjan undir álagsmiðjunni og D_i er mæld niðurbeygja í fjarlægð r_i frá miðju álagsins (Helga Þórunn Gunnlaugsdóttir, 2008).	49
Mynd 31: Breyting á yfirborðsstífni vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik.	57
Mynd 32: Breyting á burðarstuðli (B) vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik.	58

Mynd 33: Breyting á K-stuðli vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik. _____	59
Mynd 34: Breyting á krappa yfirborðsins (SCI) vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik. _____	60
Mynd 35: Breyting á krappa burðarlagsins (BCI) vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik. _____	61
Mynd 36: Breyting á skemmdarstuðli burðarlags (BDI) vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik. _____	62
Mynd 37: Breyting á flatarmáli sigdældar (AUPP) vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik. _____	63

TÖFLUSKRÁ

Tafla 1: Helstu styrkingaraðgerðir sem mælt er með í Noregi (Statens Vegvesen, 2015).	15
Tafla 2: Kornadreifing steinefnis til Bg.	16
Tafla 3: Dæmigeðir eiginleikar sementsbundins burðarlags (CTB)	24
Tafla 4: Dæmigert sementsmagn dreift á óbundið burðarlagsefni í felti (Helsted o.fl. 2006).	27
Tafla 5: Brothlutfall efnisins sem var sementsstyrkt	37
Tafla 6: Brotþol uppbyggðra kjarna	37
Tafla 7: Brotþol kjarna sem teknir voru úr veginum	38
Tafla 8: Brothlutfall efnisins úr Skálholtsvegi og Merkurlaut	40
Tafla 9: Lýsing á bikfestunarkjörnum úr Biskupstungnabraut.	41
Tafla 10: Niðurstöður prófanna á kleyfnibrotþoli bikbundnu kjarnanna úr Biskupstungnabraut.	42
Tafla 11: Niðurstöður mælinga á sýnum teknum af bikblöndun eftir fræsun (Þórir Ingason, 2004).	44
Tafla 12: Niðurstöður nýjustu mælinga og síðustu mælinga fyrir styrkingu, ásamt reiknuðum prósentumun mælinganna	50
Tafla 13: Niðurstöður nýjustu mælinga og síðustu mælinga fyrir styrkingu, ásamt reiknuðum prósentumun mælinganna fyrir bikbundin burðarlög.	52
Tafla 14: Niðurstöður nýjustu mælinga og síðustu mælinga fyrir endurlögn, ásamt reiknuðum prósentumun mælinganna	55

1 INNGANGUR

Ljóst er að á næstu árum verður nauðsynlegt að ráðast í meira mæli í styrkingu vegakerfisins þar sem endurnýjun þess og viðhald er langt undir þörfum. Vegir landsins eru flestir komnir til ára sinna og aldur þeirra almennt kominn fram yfir hannaðan líftíma. Þá hefur umferð og álag á vegi landsins aukist til muna á síðustu árum og umferðarspár gefa til kynna áframhaldandi þróun í þá veru. Þegar kemur að burðarþolsstyrkingum vega eru margar leiðir færar (Valgeir Valgeirsson o.fl. 2003), en miklu máli skiptir að velja réttu aðferðina þannig að verkefnin verði sem hagkvæmst.

Í þessu verkefni var valið að skoða tvær algengar aðferðir til styrkinga, bikbundið burðarlag og sementsbundið burðarlag, en til samanburðar voru einnig skoðaðir kaflar þar einungis var þurrfræst, keyrt í veginn og lögð á klæðing eða vegurinn að hluta endurbyggður með óbundnum burðarlögum. Reynt var að meta hversu mikið styrkur veganna jókst með hjálp falllóðsmælinga og niðurstöður þeirra bornar saman við niðurstöður annarra mælinga svo sem styrk kjarna.

Erfitt er að meta hvenær er ráðlagt að styrkja veginn og þá hvaða aðferð er heppilegust, en leitast er við að segja hvaða aðstæður þurfa að vera til staðar til þess að aðgerðin heppnist. Litið er til innlendar reynslu af styrkingum vega, en vegir hafa verið styrktir að einhverju leiti um áratuga skeið. Svo virðist sem margar nágranna þjóðir okkar hafa gefið út leiðbeiningarit um styrkingar og endurbætur á núverandi vegum sem við ættum ef til vill að líta meira til. Þar er tekið fram hvað skal kanna áður en haldið er af stað í hönnun, að hverju skal stefnt í hönnun endurbótanna og hvað skal varast. Þar er tekið skýrt fram að lausnin fellst ekki endilega í styrkingu burðarlags þótt það hjálpi í mörgum tilfellum utan þeirra þar sem hreyfingar í veginum eru miklar til dæmis við frostlyftingar.

Verkefnið verður unnið áfram á árinu 2017, þar sem falllóðsmælingar verða bakreiknaðar og sýni verða tekin úr nýframkvæmdum og eldri vegum til þess að renna styrkari stoðum undir hagkvæmni og áreiðanleika styrkinga. Teknir verða kjarnar úr vegum sem verið er að skoða og grafið í kanta þeirra til að kanna uppbyggingu vegarins.

Verkefninu er ætlað að meta áhrif mismunandi styrkinga og auðvelda hönnuðum að meta kosti og galla hvernar aðferðar fyrir sig fyrir mismunandi aðstæður og meta hagkvæmni þeirra.

2 STYRKINGAR OG ENDURBÆTUR

Vegna þess hversu erfitt er að kanna jarðefni, steinefni og vegargerðarefni almennt og ólíka eiginleika þeirra við ólík skilyrði er oft erfitt að taka vel upplýstar ákvarðanir um styrkingar. Til að taka upplýsta ákvörðun þarf mikið magn upplýsinga um veginn svo sem legu, uppbyggingu vegains, umferðina og brotmyndir. Þegar gögnin eru metin fást oft á tíðum mörg „rétt“ svör en margir samhangandi þættir valda niðurbroti vega sem og oft eru greiningaraðferðir fyrir ástand og þróun niðurbrots vega ekki til staðar eða þær ekki kvarðaðar miðað við staðhætti. Þróunin er þó í rétta átt, reglulega er fylgst með ástandi vega og aðferðafræðin batnað. Mælingar á hjólförum, hrýfi, þversniði, styrk og myndvinnsla hafa aukist og batnað á síðustu árum. Þessar greiningaraðferðir koma svo saman í viðhaldsstjórnunarkerfi vega (RMMS – Road Maintenance Management System). Þrátt fyrir aukin gögn er hins vegar oft erfitt að meta og greina hvaða aðferð til viðhalds hentar best. Þess vegna virðist stundum sem val aðferða fari eftir staðbundinni reynslu og kostnaði en ekki eftir könnun aðstæðna og mati á bestu aðferðafræðinni (Statens vegvesen, 2015).

Margar þjóðir hafa sett fram rit og leiðbeiningar um val og aðferðafræði við mat og hönnun á styrkingum og endurbótum vega (Statens vegvesen, 2015; Trafikverket, 2012; Aho o.fl., 2005; Transit, 2008; RSTA & ADEPT, 2012; Howard o.fl., 2013). En vegna þess að skemmdir á vegum eru oft vegna nokkurra samhangandi mistaka og galla í vegbyggingunni, þarf stundum samsettar aðgerðir til að ná viðunandi niðurstöðu í styrkingu og endurbótum á vegum. Þannig stoðar lítið að styrkja burðarlagið ef skemmdir í slitlagi stafa af frostlyftingum þar sem veikleiki vegbyggingarinnar liggur væntanlega neðar í vegbyggingunni. Að sama skapi hjálpar lítið að styrkja burðarlagið ef hjólför í malbiki eru vegna nagladekkja, mistaka í útlögn eða efnisvali malbiks. Finna verður rót vandans áður en ráðist er í að laga vandann. Oftast er fjárhagsáætlun til styrkinga og endurbóta mun lægri heldur en þörfin og því mikilvægt að taka vel upplýstar ákvarðanir þannig að fjármunirnir nýtist sem best.

Festun vega er vel þekkt og hefur verið framkvæmd um áratuga skeið. Hins vegar er mjög misjafnt hvaða bindiefni er fyrir valinu, en bik og sement eru þó mjög algeng. Þannig virðast Norðmenn mest megnis nota bik til festunnar á meðan Finnar kjósa sement. En oft virðist sem bæði efnin séu notuð en annað efnið þó algengara en hitt og spilar þar verð bindiefnis stóran þátt.

Bik og sement hafa ólíka eiginleika en bik viðheldur sveigjanleika í vegbyggingunni á meðan sement gerir hana stífari. Þannig þarf að varast að miklar hreyfingar séu í vegbygginu sem bundin er með

sementi, til dæmis ef búast má við sigi, frostlyftingum og öðrum mismunahreyfingum geta myndast sprungur á yfirborðinu sem erfitt er að laga. Hins vegar getur sementið hentað vel þar sem dreifa þarf álagi frá þungaumferð jafnar yfir undirlagið. Norðmenn virðast hafa lent í vandræðum með sement þar sem frostlyftingar hafa verið vandamál og þreytusprungur myndast á yfirborði slitlagsins. Í Finnlandi er sement mikið notað, en þar er gerð krafa um hámarks hreyfingu í vegbyggingunni þegar sement er notað. Bretar telja æskilegra að nota bik til að viðhalda sveigjanleikanum, en verð virðist þó ráða mestu um val bindiefnis (RSTA & ADEPT, 2012). Í Þýskalandi, Bandaríkjunum og Kanada er vel þekkt að sementsfesta og hefur verið gert um áratuga skeið við góða raun þar sem ending er löng og viðhald lítið (Halsted o.fl., 2006).

Nokkur atriði sem rétt er að hafa í huga þegar bindiefni til festunnar er ákveðið:

- Sement gefur stífa vegbyggingu og meðan bik gefur sveigjanlega.
- Sement gefur styrk fyrr heldur en bik, bikfesting getur verið einhver ár að ná fullum styrk.
- Oft má hleypa umferð fyrr á sementsstyrkt burðarlög borið saman við bikbundin burðarlög.
- Fyrir mjög fínefnaríkt steinefni hefur reynst vel að blanda það fyrst með sementi og festa svo með biki.
- Hægt er að festa efni með breiða kornadreifingu. Ef steinefni eru frostnæm eða með hátt fínefnainnihald er bindiefnismagn aukið.
- Sementsfestun er viðkvæm fyrir missigi í undirbyggingunni þess vegna þarf að tryggja jafnarra og stabílla undirlag undir sementsfestun borið saman við bikfestun.
- Bikfestun er viðkvæmari fyrir veðurskilyrðum við útlögn. Þannig er bikfestun háðari hitastigi og fer mjög illa ef rignir í hana. Sementsfestunin þolir hins vegar talsverðan úða áður en hún fer að skemmast en hitastig þarf að vera nægilega heitt til þess að sementið hvarfist.
- Þekkt er að nota affals- og aukaafurðir sem falla til við iðnaðarframleiðslu í sementsfestanir.
- Oftast er nauðsynlegt að loka yfirborðinu fljótlega eftir festun.

Með góðum forrannsóknum, réttri hönnun, góðum tækjum og vel útfærðri framkvæmd eru kostir festunnar nýttir og gallarnir sniðgegnir (Njörður Tryggvason, 1996a). Festanir burðarlaga virðast gefa góða endingu og styrk séu þær rétt hannaðar og framkvæmdar.

2.1 Noregur

Styrking vega miðar að því að auka burðarþol vega, en undir styrkingar falla þó einnig aðrar óbeinar aðgerðir sem stuðla að bættum akstursskilyrðum s.s. jöfnun á frostlyftingum, styrking axla, bætt slitlagsskilyrði o.s.frv. Í Noregi er miðað við að styrkingar núverandi vega skuli kanna ef auka á leyfilegan öxulþunga og/eða ef auka þarf endingu slitlags. En þó getur einnig verið viðeigandi að styrkja veg samhliða öðrum aðgerðum s.s. þegar laga þarf þver- og/eða langsníð, þegar verið er að uppfæra úr malarslitlagi í bundið slitlag, þegar breikka þarf veginn eða styrkja axlir. Sömu kröfur eru gerðar til styrkinga og nýbygginga, á það m.a. við um afvötnun, aðgerðir gegn frostlyftingum, tenginga milli breikkanna og núverandi vegar, styrktarlags, burðarlags, slitlags og framkvæmdar. Styrkingar eru yfirleitt hannaðar til 20 ára með 10 tonna öxulþunga til að reikna fjölda jafngildisöxla (N) (Statens Vegsesen, 2014a).

Norðmenn telja þörf á styrkingu þegar líftími slitlagsins er óeðlilega lár m.v. hvað er talið ásættanlegur eða hefðbundinn líftími slitlags fyrir gefna árdagssumferð og ef auka á öxulþunga á vegi. Hefðbundinn líftími slitlags, er sá líftími sem hægt er að búast við af vegi sem er rétt byggður og verður fyrir hefðbundnum umhverfis- og álagsskilyrðum (Mynd 1). Staðbundnar aðstæður geta breytt líftíma slitlagsins sem og þykkt þess, steinastærð í malbiki, umferð sem leitar í sama sporið, nagladekk og svo mætti lengi telja.

L	NORMERTE DEKKELEVETIDER ¹⁾ FOR ULIKE DEKKETYPER (år)						
	ADT						
Dekketype	≤300	301-1500	1501-3000	3001-5000	5001-10 000	10 001-20 000	>20 000
Ska				13	10	7	6
Ab			15	12	9	6	5
Agb		15	14	11			
Ma, Egt	16	13	12				
Eo	14	12					

1) Normale utslag i dekkelevetiden vil være ± 2 år, afhængig av klima og andre lokale forhold.

Mynd 1: Almennur líftími slitlags (ár) fyrir ólíkar gerðir slitlags og mismunandi árdagssumferð (ÁDT) (Statens Vegsesen, 2014a).

Líftími slitlags er ákvarðaður út frá þróun hjólfaradýpis og sléttleika, og líkur þegar þörf er á endurnýjun þess. Lár líftími slitlags gefur vísbendingu um að eitthvað sé að í veguppbyggingunni, en þýðir ekki endilega að vegurinn þarfnist styrkingu. Þegar verið er að skoða líftíma slitlags er nauðsynlegt að aðgreina þau atriði sem geta haft áhrif á líftímamann s.s. frostlyftingar, kantsprungur, röng efnisnotkun, nagladekkjanotkun sem og veikleikar í uppbyggingu.

Styrkingaraðferðir eru metnar út frá líftímastuðli (f):

$$f = \frac{\text{raunverulegur líftími slitlags}}{\text{hefðbundinn líftími slitlags}}$$

- $f \leq 0,7$ – skal gera prufuholur til að kanna mögulegar ástæður skamms líftíma og kanna endurbætur samhliða styrkingu vegarins.
- $f > 0,7$ – yfirleitt er nóg að leggja nýtt slitlag, en getur verið rétt að skoða aðgerðir á lögum undir slitlaginu.
- $0,5 < f < 0,7$ – ákvarða F_{diff} sem er þörf styrkingar (þykkt x álagsdreifingarstuðul) (Mynd 2). Viðeigandi styrking er ákveðin með prufuholu, en einnig lagt mat á líkum endurtekens brots.
- $f < 0,5$ – gefur til kynna að eitthvað grunnatriði sé að í uppbyggingu vegarins. Eitthvað misfarist við byggingu vegarins, hann undirhannaður, rangar lagþykktir og efnisgæði í einu eða fleiri lögum. Reynt er að greina hvar vandamálið liggur með prufuholu og með greiningu brotmynda. Einnig er gott að notast við aðrar mælingar s.s. niðurbeygjumælingar og DCP/CBR. Ef ástæður lélegs líftíma eru ekki greinilegar skal styrkingin hönnuð eins og í nýrri vegbyggingu, Mynd 3.

Svipaðri aðferðafræði er beitt þegar auka þarf styrk vegna vegna aukningar í leyfilegum öxulþunga bifreiða. Aðferðafræði Norðmanna er ansi ítarleg og má sjá ferlið myndrænt á Mynd 4.

Levetidsfaktor 2)	Trafikkgruppe (N, mill.)			
	A (< 0,5)	B (0,5 - 1)	C (1 - 2)	D (2 - 3,5)
f = 0,7	9	9	10	11
f = 0,6	12	13	14	15
f = 0,5	15	17	18	19

1) I tillegg til de oppgitte indeksverdier forutsettes at evt. spordannelse er rettet opp
2) Vegdekkets levetidsfaktor, f = forholdet mellom funksjonell dekkelevetid og normert dekkelevetid

Mynd 2: Styrkingarþörf (F_{diff}) vegna óvenju lágs líftíma slitlags (Statens Vegsesen, 2014a).

KRAV TIL INDEKSVERDIER ETTER FORSTERKNING								
		TRAFIKKGRUPPE						
		(Antall ekvivalente 10 t aksler pr. felt i dimensjoneringsperioden, N, mill.)						
Over materialer i overbygningen eller i grunnen	Bæreevne gruppe	A1 (< 0,2)	A2 (0,2 - 0,5)	B (0,5 - 1)	C (1 - 2)	D (2 - 3,5)	E (3,5 - 10)	F (> 10)
Materialer med lastfordelingskoeffisient $a \leq 1,35$ 2)		18 1)	18 1)	18 1)	29	31	50	52
Grus Cu ≥ 15 , T1 Knust fjell, Cu ≥ 15 , T1	1, 2	35	47	52	56	59	66	68
Grus Cu < 15, T1 Sand Cu ≥ 15 , T1 Knust fjell, T2	3	35	47	52	56	67	82	84
Sand Cu < 15, T1 Grus, sand, morene, T2	4	47	55	60	72	83	98	108
Grus, sand, morene, T3	5	56	63	76	88	91	106	116
Silt, leire, T4,	6	64	71	84	88	100	114	124

1) Dersom dekket består av Agb eller stivere dekketype

2) Stabilisert bærelag med sprekker eller krakelering, alvorlighetsgrad H (håndbok V261) skal ikke regnes med

Mynd 3: Kröfur til burðarlagsgildis eftir styrkingu (Statens Vegsesen, 2014a).

Helstu prófunaraðferðir sem eru notaðar til að ákvarða þörf og gerð styrkingar eru:

- Uppgröftur

Gefur til kynna uppbyggingu vegar, lagþykktir og efnistuðla með síðari prófunum á rannsóknarstofu. Þá er hægt að reikna burðarlagsgildi vegbyggingarinnar og styrkleika. Þegar búið er að ákvarða burðarlagsgildið er hægt að ákvarða F_{diff} (Mynd 2). Niðurstöður uppgraftrar sýna yfirleitt þörf á meiri styrkingu heldur en niðurbeygjumælingar.

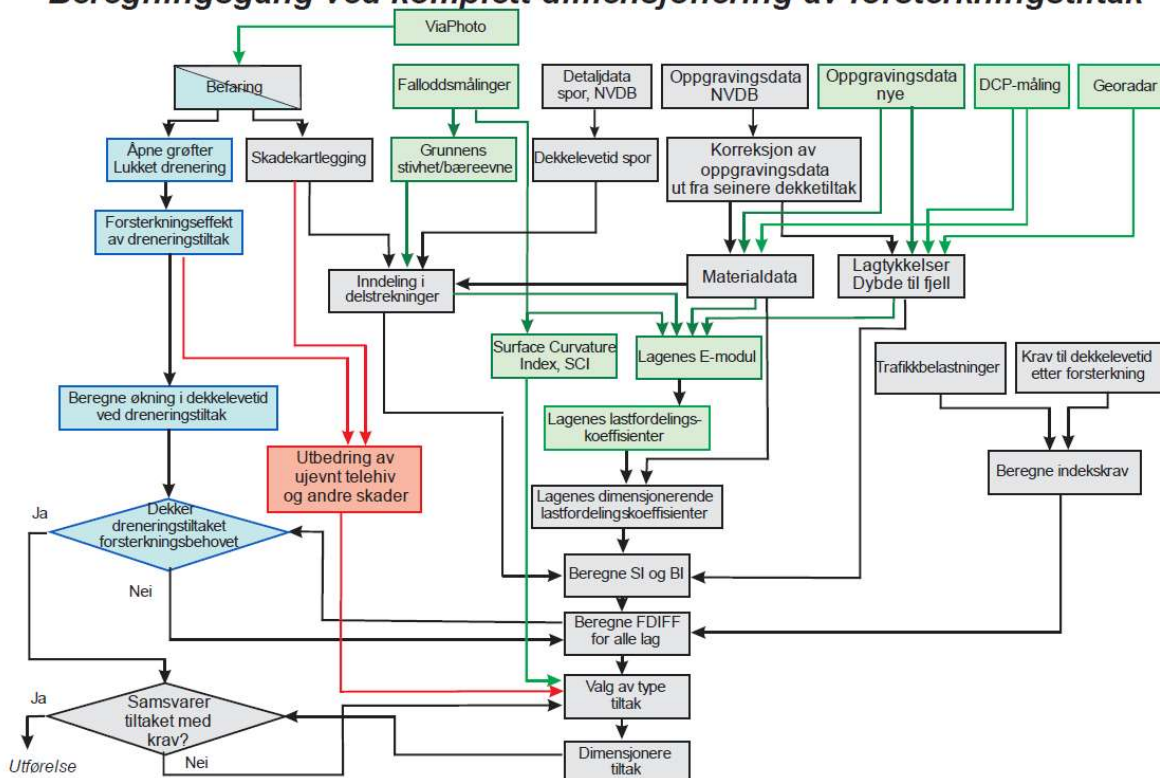
- DCP (Dynamic Cone Penetrometer) / CBR (California Bearing Ratio) mælingar

Hægt er að ákvarða burð undirlagsins með DCP eða CBR mælingum í felti. Báðar aðferðirnar gefa til kynna skerstyrk (shear strength) efnisins. Mælt er með því að mæla að vori þegar burðurinn er minnstur. Hægt er að sjá nánari lýsingu á aðferðunum í handbókum R211 (DCP) og R210 (CBR) (Statens vegvesen, 2014b & 2014c).

- Niðurbeygjumælingar

Til viðbótar við uppgröft og DCP / CBR mælingar getur verið gott að framkvæma niðurbeygjumælingar s.s. falllóðsmælingar. Bakreikna skal stífni (E-gildi) mismunandi laga vegarins og meta hversu vel vegbyggingin dreifir álaginu. Nánar er fjallað um falllóðsmælingar seinna í skýrslunni.

Beregningsgang ved komplett dimensjonering av forsterkningstiltak



Mynd 4: Skematísk mynd af ákvarðanarferli og hönnun styrkingar í vegi (Statens Vegsesen, 2015).

2.1.1 Val styrkingaraðferða

Í norska leiðbeiningaritínu forsterkningar av vegar (Statens Vegvesen, 2015) eru taldar upp 14 mismunandi aðferðir til styrkinga (Tafla 1). Hvaða aðferð eða aðferðir eru notaðar verður að meta í hverju tilfalli fyrir sig, en oft þarf að sameina aðferðir. Til að ákvarða aðferðafræði þarf að kanna:

- Stærðargráða styrkingarinnar, ef svæðið er lítið má hugsa sér að þykkja malbik og styrkja vegbygginguna þannig en ef svæðið er stórt getur verið mun hagstæðara að styrkja burðarlagið og þynna malbikið.
- Veghönnunin, breidd og vegferill vegar skiptir miklu máli þar sem sumir vegir eru ekki breikkaðir samhliða styrkingum og sumar styrkingaraðferðir draga úr vegbreidd.
- Sprungur og sprungumynstur í slitlaginu, endurbætur eiga að stuðla að því að vegbyggingin haldi sér í tilskilin tíma eftir að endurbótum er lokið. Þess vegna þýðir t.d. ekki að leggja eingögnu nýtt malbikslag á veg sem er mikið sprungin, með stórar strungur. Sprungurnar eru líklegar til að koma fljótt í gegnum nýja yfirlagið. Leita verður svara við spurningunum hvers vegna er sprungumyndunin og hversu miklar eru hreyfingarnar sem valda henni.

Í Noregi er mælt með því að athuga sérstaklega afvötnun sem hluta af styrkingar og endurbótaferlinu.

Tafla 1: Helstu styrkingaraðgerðir sem mælt er með í Noregi (Statens Vegvesen, 2015).

LÝSING		ATHUGASEMD
1	Opnir skurðir	Bætir almennt burðargetu vegarins Bætir ástand flestra vega
2	Lokuð drenering	Bætir almennt burðargetu vegarins Bætir ástand flestra vega
3	Afrétting / fræsing	Bætir þversíðum og lengarprófil Hefur takmörkuð áhrif á aðrar skemmdir
4	Heitblandað bikbundið burðarlag	Bætir almennt líftíma yfirlags Þarfnast góðs aðgengis að blönduðu efni á ásættanlegu verði
5	Kaldblandað bikbundið burðarlag	Bætir almennt líftíma yfirlags Er einföld og vel færarleg framleiðsla
6	Festun burðarlags (djúp festun)	Virkar vel þar sem burðarlagsefnið er vatns- eða frostnæmt, bætir þversnið og lengdarprófil vegarins, dregur úr líkum á sprungum. Heildaruppbygging vegarins verður að vera í lagi.
7	Burðarlag með biksmjúgið þúkk	Bætir almennt burðargetu vegarins. Krefst þess að þykkt þúkkklagisins sé með jafna þykkt, má framkvæma samhliða öðrum aðgerðum sem stuðla að bættum vegprófil.
8	Burðarlag með fleyguðu / kíldu þúkki	Bætir almennt burðargetu vegarins. Krefst þess að þykkt þúkkklagisins sé með jafna þykkt, má framkvæma samhliða öðrum aðgerðum sem stuðla að bættum vegprófil.
9	Þurrfræsing	Á við óbundin burðarlög með óhagstæða kornadreifingu, bætir þversíðum og lengarprófil
10	Tenging / jöfnun (Uttilinger)	Framkvæmt til að jafna ójöfnur vegna frostlyftinga. Aðgerðin er oft sameinuð með öðrum aðgerðum s.s. frárennsli og staðbundin massaskipti (efnisakipti)
11	Styrking axla	Ráðstafanir til að laga kant-, langsprungur o.fl. Hægt er að grípa til nokkra mismunandi aðferða eftir umfangi og orsök brotsins.
12	Breikkun vegar	Almenn aðgerð til úrbóta á vegum með litla breidd og þar með talið breiddarútvíkkun í beygjum. Aðgerðin er einnig stundum nauðsynleg samhliða öðrum styrkingaraðgerðum sem leiða til þrengra þversniðs.
13	Styrking með stálneti	Á aðallega við þar sem draga þarf úr langsprungum vegna frostlyftinga.
14	Styrking malbiks með plastneti	Oft tengd við aðrar styrkingaraðgerðir s.s. breikkanir og styrkingar axla.
15	Styrking óbundinni laga	Á einnig við um styrkingar óbundinna laga með plast neti. Þessi aðgerð á mest við þar sem verið er að tryggja stöðuleika og burðarþol þegar vegurinn er í byggingu
16	Massaskipti (efnaskipti)	Getur verið allt frá því að skipta út hluta af vegi til þess að byggja nánast nýjan veg.
17	Massaskipti vega á mýri	Auk hefðbundinni massaskipta innifelur aðgerðin í sér að nota léttu massa (EPS, gler perlur o.s.frv.) sem og aðrar aðferðir til þess að minnka sig (þjöppun) vegbotnsins.

Hérna verður litið til aðferðar 6 sem er þurrfræsing og styrking burðarlags með biki, hinum aðferðunum er lýst í leiðbeiningarritinu forsterkningar av vegar (Statens Vegvesen, 2015).

2.1.2 Bikbundið burðarlag

Til eru margar gerðir af bikbundnu burðarlagi s.s. asfaltert grus (Ag), asfaltert þúkk (Ap), penetrert þúkk (Pp), emulsjonsgrus (Eg), emulsjonsþúkk (Ep), skumgrus (Sg), bitumenstabilisert grus (Bg) og knust asfalt (Ak). Hægt er að lesa sér til um mismunandi eiginleika þessarar bikbundnu burðarlagi í N200 handbókinni (Statens vegvesen, 2014a) en hér að neðan verður einungis fjallað um Bg eða bikbundna mól / grús sem verður til við kaldblöndun á biki og fræstu burðarlagi í veginum. En einnig eru Eg og Sg notuð en lýsingu á þeim má nálgast í N200 handbókinni. Bg er talin umhverfisvæn lausn bæði hvað varðar framleiðsluna og framkvæmdina. Umfjöllunin hér að neðan byggir á N200 handbókinni (Statens vegvesen, 2014a) og ritinu forsterkningar av vegar (Statens Vegvesen, 2015).

Í Bg skal bindiefnisinnihaldið vera að minsta kosti 3,0 % og eru bindiefnisleyfar sem eru fræstar upp ekki meðtaldar. Bindiefnisinnihaldið er aðallega háð fínefnainnihaldinu en efnið verður að uppfylla kröfur sem gerðar eru til álagsdreifingarstuðulsins, stöðugleika og frostmótstöðu. Álagsdreifingarstuðullinn skal vera að minnsta kosti 1,5. Þó verður að gæta þess að bindiefnisinnihald og kornadreifing (Tafla 2) séu innan marka og að efnið sé þjappað um leið og það er lagt.

Tafla 2: Kornadreifing steinefnis til Bg.

ISO-SIGTI [MM]	SÁLDUR (MASSA-%)
16	85-100
11,2	70-100
8	58-95
4	40-77
2	30-63
0,25	10-25
0,063	5-17

Framleiðslan fer þannig fram að burðarlagið er fræst. Síðan er efnið fest með froðubiki (skumbitumen) eða bikþeytu (emulsjon). Mikilvægt er að rakastig steinefnisins sé á milli W_{opt} og $W_{opt} - 0,5 \times$ bindiefnisinnihaldið þegar efnið er lagt. W_{opt} er ákvarðað með modified proctor. Þar sem Bg getur verið lengi að taka sig er ekki mælt með að leggja efnið seint að hausti. Binding og þróun Bg fer eftir stífleika, umferð og loftslagi. Tryggja skal að umferð sé ekki of mikil fyrst eftir að Bg er lagt og mælt er til þess að slitlag sé lagt fljótlega eftir að Bg hefur verið lagt. Bg er viðkvæmt fyrst eftir að það er lagt sérstaklega fyrir mikilli umferð og úrkomu.

Við styrkingu á gömlum vegi verður að kanna og hanna festunina áður en lagt er af stað. Almennt er ferli styrkingar á gömlum vegi með þessum hætti:

1. Þar sem þykkt malbiksins er meiri en 5-6 cm, skal fræsa malbikið af fyrst og koma fyrir á millilager. Skilja skal eftir u.þ.b. 2 cm af malbiki.
2. Skoða skal sérstaklega hvort að þörf er á því að fjarlægja lífræna kanta þar sem ekki er æskilegt að lífræn efni blandið við fræsið sem skal styrkja.
3. Þurrfræsing. Restin af malbikinu og burðarlagið er fræst upp og skal dýpt fræstingar vera um 5 cm dýpri heldur en áætluð styrking.
4. Laga þversnið vegarins með veghefli, ásamt vötnun og léttri þjöppun. Ef núverandi burðarlag hefur hátt fínefnainnihald eða á annan hátt hefur ekki rétta kornadreifingu er hægt að leggja út púkk til þess að bæta kornadreifinguna. Magnið fer eftir dýpt festunnar og kornadreifingu burðarlagsins, en algengt er að bæta við 5-7 cm af óþjöppuðum massa.
5. Fræstun og styrking. Bindiefninu er bætt við steinefnið sem hluti af fræsunarferlinu, á þetta bæði við um þegar notað er froðubik og bikþeyta.
6. Heflun til að jafna þversniðið ásamt þjöppun á styrkta/festa burðarlaginu.
7. Lagning slitlags skal framkvæmd minnst 3 dögum og mest 8 dögum eftir styrkingu. Hámarkshraði skal vera 30 km/klst þangað til slitlag hefur verið lagt á styrkinguna.

Þegar verið er að velja á milli froðubiks og bikþeytu til styrkingar er það yfirleitt ákvarðað út frá fínefnainnihaldi efnisins sem skal styrkja. Froðubik hentar oft betur fínefnaríkum massa á meðan bikþeyta krefst yfirleitt lágs fínefnainnihalds. Þar sem styrkingar eru oft framkvæmdar þar sem fínefnainnihald burðarhalds er of hátt hefur froðubik verið notað meira.

Magn bindiefnis fer eftir tilgangi bindingarinnar, þannig er gerður greinamunur á auðgun og festun. Auðgun er notuð til þess að binda fínefni og minnka frost- og vatnsnæmni efnisins. Magn bindiefnis er þá í kringum 1,5% af massa efnisins. Þegar verið er að festa burðarlagsefni verður bindiefnið að vera að minnsta kosti 3,0%. Magn bindiefnis er ákvarðað með því að gera prófblokkir sem hægt er að mæla óbeinan togstyrk (indirect tensile strength) á eða burðargildi (E-gildi) með þríasaprófi, þessar niðurstöður er svo notaðar til þess að meta álagsdreifingarstuðull efnisins.

Þegar verið er að styrkja/festa burðarlög, sérstaklega með froðubiki, er mælt með að nota gúmmihjólavalta til þjöppunar, gjarnan ásamt hefðbundnum valta. Þyngd hjólsins skal vera að minnsta kosti 1 tonn.

Áður en fræsun hefst skal kanna:

- Þykkt malbiks og breytingar í malbiksþykkt (má mæla með georadar). Ef malbiksþykktin er talin nokkuð jöfn má athuga þykkt malbiksins með kjarnaborunum.
- Kanna verður hvort að stál eða plastnet er í veginum, en það skal fjarlægja áður en fræsun hefst.
- Íhuga verður hættu af stórum steinum í efnismassanum sem á að fræsa. Stórir steinar geta eyðilaggt tennur í fræsanum og gera aðferðina minna fýsilega. Hægt er að nota georadar til að meta magn stórra steina í veginum.

Helstu kostir, gallar og ráðleggingar varðandi aðferðina eru:

- Aðferðin er talin mjög heppileg þar sem frostlyftingar og/eða óstöðugt burðarlag er til staðar, en lög vegarins uppfylla lágmarks þykktir. Ástæða er að bikbindingin eykur almennt gæði efnisins og bætir burð vegbyggingarinnar í einhverjum mæli. Ef burðarlagið er óstöðugt gæti þurft að keyra í auka efni til þess að jafna kornadreifinguna.
- Aðferðin breytir ekki breidd vegarins enda er verið að nota efni sem eru til staðar í veginum.
- Helstu áhættur aðferðarinnar eru skortur grunnupplýsinga og stórir steinar í burðarlaginu, en stórir steinar hafa haldið aftur af mönnum við að nota aðferðina.
- Styrktaraukning efnisins tekur tíma, þannig þíðir ekkert að mæla niðurbeygju strax eftir framkvæmd og bera saman við niðurbeygjumælingar sem teknar voru fyrir styrkingu. Mælingar sem teknar eru fljótlega eftir bikbindingu munu að öllum líkindum sýna minni styrk heldur en fyrir styrkingu. Hins vegar eykst styrkur efnisins með tíma, og álagsdreifingarstuðulinn eykst úr 0,75 í 1,75.
- Hægt er að auka styrkinn frekar með aðlagaðri hönnun styrkingar og eykst þá álagsdreifingarstuðulinn.
- Þegar verið er að auðga efnið og binda með því fínefni þá má gera ráð fyrir að álagsdreifingarstuðulinn hækki úr 0,75 í 1,0.
- Ráðlagt getur verið að leggja mjúkt malbik eða klæðingu fyrst á bikbundna burðarlagið og jafna hæðina seinna með nýju yfirlagi.

2.1.3 Sementsbundið burðarlag

Það sem vekur athygli að í leiðbeiningarritinu forsterkningar av vegar (Statens Vegvesen, 2015) er ekki minnst á styrkingu burðarlags með sementi að öðru leiti en að gefa upp álagsdreifingarstuðulinn úr

norsku handbókinni N200 (Statens Vegsesen, 2014a). Sementsbundin burðarlög eru heldur ekki nefnd á Mynd 5 í N200 um ráðlögð efni í burðarlög.

Bærelagstype		Øvre bærelag						Nedre bærelag							
		Trafikkgruppe ¹⁾						Trafikkgruppe ¹⁾							
		A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F		
Knust grus ²⁾	Gk	■													
Knust fjell	Fk	■													
Asfaltert grus	Ag		■	■	■	■	■								
Asfaltert pukkk	Ap		■	■	■	■	■								
Penetrert pukkk	Pp		■	■	■	■	■								
Gjenbruksasfalt ³⁾	Gja	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Knust asfalt	Ak	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

- 1) Nedre grense er økonomisk betinget. Øvre grense er satt av funksjonsmessige årsaker.
- 2) Knust grus brukes ikke på riksveg eller som øvre bærelag på vegger med N > 0,2 mill.
- 3) Bruken av Gja bør vurderes i hvert enkelt tilfelle, se pkt 512.6.

Mynd 5: Notkunarmöguleikar efna í burðarlög (Statens Vegsesen, 2014a).

Í N200 staðlinum (Statens Vegsesen, 2014a) er sementsstyrking burðarlags nefnd og kröfur tilgreindar, en tekið skýrt fram tryggja verði að ekki myndist stórar sprungur í efninu og að ekki megi nota efnið þar sem hættu er á frostlyftingum eða frostlyftingar hafa átt sér stað. Einnig má ekki nota efnið á aðkomuvegum og göngu og hjólastígum. Að lokum er varað við sprungumyndun á skilum sementsfestingar og annars lags burðarlags. Hins vegar er bent á að í sumum tilfellum geti verið ráðlagt að styrkja burðarlagefni sem ekki uppfyllir kröfur sem gerðar eru til óbundins burðarlags hvað varðar styrk, kornastærð, kornadreifingu og berggreiningu. Þær kröfur sem eru gerðar til sementsbundins burðarlags eru:

- Lágmarksþykkt er 200 mm.
- 7 daga sýnastyrkur efnisins sé $5 \pm 0,8$ MPa.
- 28 daga styrkur úr útlögðu efni sé $7 \pm 1,1$ MPa.
- Vatns sements tala efnisins skal vera $0,8-1 \pm 0,2\%$.
- Vatnsinnihaldið skal vera 1-2% fyrir neðan optimal Modified Proctor vatnsinnihald.
- Kornadreifingin er sú sama og á Íslandi enda er íslenska kúrfan fengin úr norsku handbókinni. Gæta skal þess að kornadreifing efnisins þjappist vel.
- Lágmarks sements innihald skal vera 4,5% af heildar magni þurrs steinefnis.

Leitast skal við að halda raka í efninu með því að loka yfirborðinu sama dag og burðarlagið er lagt áður en slitlag er lagt á veginn. Mælt er með því að nota polymermodifisert bitumenemulusion PmBE, en einnig er hægt að setja klæðingu (Eo) með bindiefninu PmBE. Þegar yfirborðið er límt er mikilvægt að yfirborðið sé þurrt, en yfirborðið má þó hafa jarðraka (jord-fuktig). Gæta skal vel að límingu, eða annari yfirborðsmeðhöndlun, milli sementsbundna burðarlagsins og malbiks, slétt yfirborð sementsbindingarinnar getur valdið lélegri viðloðun. Áður en slitlag er lagt skal sópa laust efni af yfirborðinu og tryggja viðloðun. Efnið er lagt án steypuskila, og hægt er að hleypa umferð á veginn um leið og efnið hefur verið lagt (nema þegar um sand og púkk er að ræða, þá skal bíða í 1-2 daga). Ef styrkur efnisins fer yfir 7 MPa skal setja inn steypuskil.

2.2 Bretland

The Road Surface Treatments Association (RSTA) ásamt The Association of Directors of Environment, Economy, Planning and Transport á Bretlandi gáfu út árið 2012 ritið “Code of Practice for In-situ Structural Road Recycling“. Í ritinu er farið yfir það helsta sem þarf að hafa í huga þegar verið er að endurnýja vegi og styrkja án þess að keyra í nýtt efni og endurbyggja veginn. Mælt er með því að kanna alltaf möguleikann á styrkingu áður en hafist er handa við að endurbyggja veginn eða leggja nýtt slitlag. Á Mynd 6 má sjá flæðirit af ákvörðunarferlinu og Mynd 7 sýnir flæðirit af ákvörðunarferlinu til að finna heppilegasta bindiefnið.

Það getur verið mjög dýrt að leggja nýtt slitlag á veg sem ekki hefur nægjanlegt burðarþol, þá verður ending slitlagsins ekki sem skildi og kostnaður við viðhald of hár. Í flestum tilfellum er mun hagkvæmara er að styrkja veg heldur en að endurbyggja ásamt því að vera betra fyrir umhverfið og minna rask við framkvæmdina. Þegar verið er að styrkja veg er verið að endurvinnna og endurnýta efni sem er til staðar í veginum, og ef vel er að verki staðið er ending og styrkur vegarins sá sami og um hefðbundna nýbyggingu væri að ræða, en gert er ráð fyrir 20-40 ára hönnunartíma og á það bæði við í og utan þéttbýlis.

Það eru fjögur meginatriði í staðháttum sem þarf að kanna áður en ákveðið er að styrkja vegbyggingu:

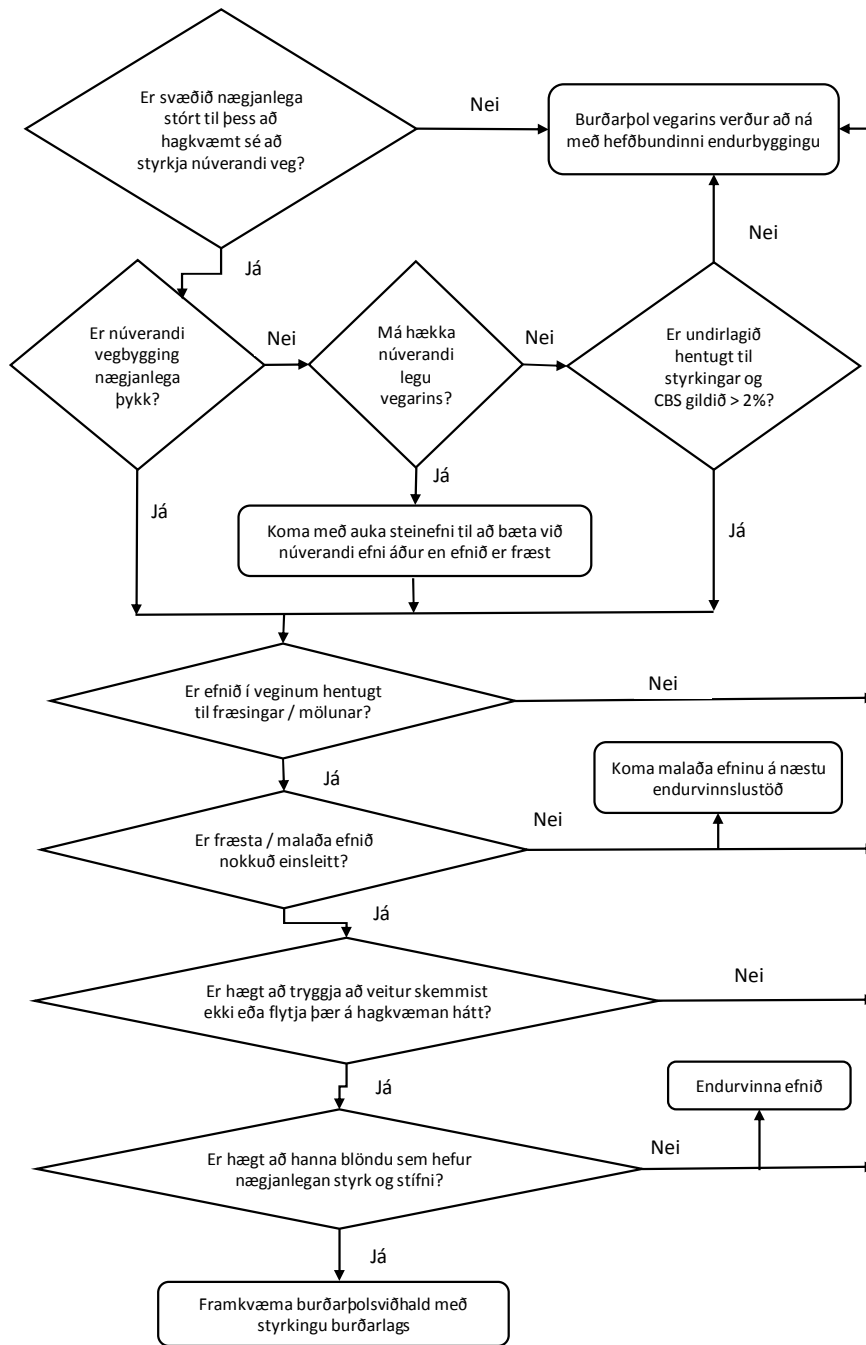
- Hver er megin ástæða fyrir broti núverandi vegbyggingar.
- Hversu mikil umferð er um veginn.
- Henta efnin sem eru í núverandi vegbyggingu til styrkingar.
- Veitur.
- Afvötnun, ætti alltaf að kanna hvort heldur sem vegurinn verður styrktur eða endurbyggður.

Sum efni er ekki hagkvæmt að styrkja en það á aðallega við ef harðir steinar í yfirstærð eru í efninu, ef vegurinn er gerður úr steypu, ef burðarlagsefnið inniheldur lífrænan mó eða leifar af leir. Þessi efni eru ekki algeng og er því í flestum tilfellum hagkvæmt að styrkja vegbyggingar. Kanna skal hvort styrking henti burðarlagsefninu, annað hvort með því að styrkja það á staðnum eða styrkja það og keyra aftur í veginn. Auk þess að kanna gögn og upplýsingar um vegbygginguna skal gera ráð fyrir prufuholu á hverjum 500 m² en stundum er raunhæfara að auka svæðið í 800 – 1000 m². Prufuholurnar skulu vera a.m.k. 45 cm djúpar og nægjanlega stórar til þess að raunhæft sýni náist úr veginum. Æskilegt er að hægt sé að kanna undir- og styrktarlag. Prófa skal efnið í samræmi við leiðbeiningar TRL (Transport Research Laboratory) og aðferð til endurbóta ákveðin í samræmi við niðurstöður prófanna. Þegar kemur að vali á bindiefni eru margir þættir sem þarf að skoða s.s.:

- Fjármagn.
- Sjálfbærni og umhverfispættir.
- Umferðarþungi.
- Styrkur undirlags.
- Önnur atriði í umhverfinu og undirlaginu.

Flest staðbundin styrkingarverkefni í Bretlandi hafa verið framkvæmd með Quick Hydraulic (QH), Medium Hydraulic (MH) eða Quick Visco Elastic (QVE) froðubiki. QVE froðubik var mikið notað á níunda og tíunda áratug síðustu aldar við góða raun en eins og með önnur bikbundin efni þá hefur notkun þeirra minkað með hækkandi verði. Bikbundin festun (Bituminous Bound Mixture (BBM)) er talin vera

sveigjanlegt endurrunnið burðarlag. Það er eiginleiki sem oft er leitast við í hönnun. Val á bindiefni er oft háð verði og aðgengi að efni nálægt vinnusvæði.

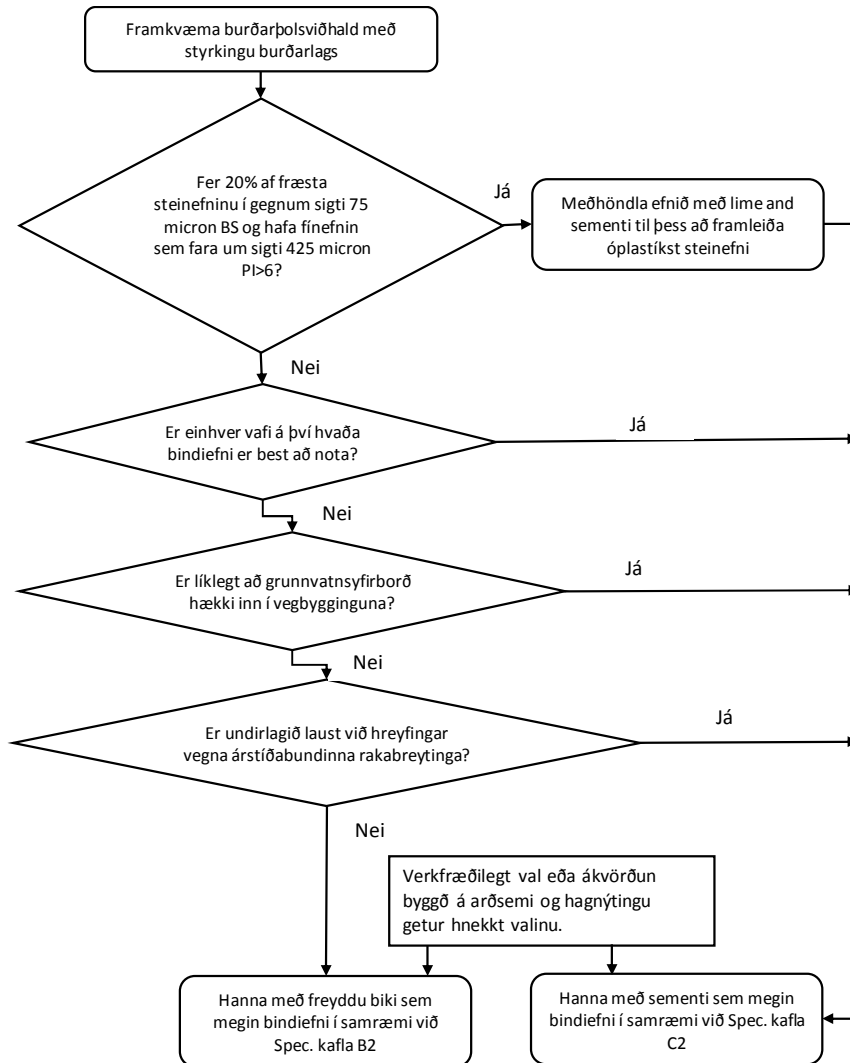


Mynd 6: Flæðirit af svæðismati eða könnun á staðháttum þegar vegur þarfnast endurbóta.

Bikbundin festun er talin vera sveigjanlegt endurrunnið burðarlag, eins og áður sagði en t.d. sementsbundin burðarlög eru stíf (hydraulically bound mixtures (HBM)). Þegar verið er að hanna stíf burðarlög þarf að kanna mögulegar hitaþennslur og þ.a.l. sprungum í stífum HBM burðarlögum. Hins vegar hafa sprungur í stífum sementsbundnum burðarlögum minnkað til muna eftir að farið var að blanda flugösku (Pulverised Fuel Ash (PFA)) í blönduna og hlutfall hefðbundins Portland sements minnkað að sama skapi. Með blönduninni er framleitt burðarlag með minni upphafsstyrk sem eykst svo smám saman vikum, mánuðum og jafnvel árum eftir að burðarlagið er lagt. Sementið gefur

burðarlaginu upphafstyrk sinn og stöðugleika þannig að hleypa má umferð á veginn næstum um leið og framkvæmd er lokið, það er hins vegar flugaskan sem veitir styrktaraukninguna yfir tíma og minnkar þannig líkur á hitaþennslusprungum yfir líftíma vegarins.

Bikbundin burðarlög eru orðin mun dýrari í framleiðslu heldur en stíf burðarlög, er það ein megin ástæða þess að stíf burðarlög eru að verða algengari heldur en bikbundin burðarlög. Önnur affalsefni og aukaafurðir iðnaðarframleiðslu hafa einnig verið notuð til styrkinga burðarlaga.



Mynd 7: Flæðirit sem hjálpar til við ákvörðun á bindiefni.

Mikilvægt er að prófa og hanna blönduna, leggja fram áætlun um þjöppun og eftirlits prófanir. Finna má lýsingu á hönnunarferlinu í „Specification for Highway Works CH 947 In-situ Cold Recycled Bound Material“. Það sem er talið allra mikilvægasta skilyrði fyrir styrkingu er kornadreifing efnisins sem á að meðhöndla. Ljóst þarf að vera í upphafi verks hvaða aðferð skal notuð, dýpi meðhöndlunar, hvaða bindiefni skal nota, magn (prósenta) bindiefnis, hagstæðasta rakainihald og eðlismassa efnisins.

2.3 Nýja Sjáland

Á Nýja Sjálandi er gott steinefni uppurið eða svo gott sem í opnum námum og erfitt getur reynst að fá leyfi til þess að opna nýjar. Vegna þessa eru menn að leita meira til festunnar burðarlags, og endurnýtingu efna og forðast notkun nýrra steinefna. Verkfræðingar á Nýja Sjálandi hafa kvartað yfir því að rannsóknir, upplýsingar (m.a. um endingu og frammistöðu) og hönnunaraðferðir vanti til að hanna styrkta vegi og við notkun endurunna og nýrra efni í vegbyggingar. Sett var á fót rannsóknarverkefni þar sem leitast var við að svara eftirfarandi 4 spurningum:

1. Skoða kosti þess að nota sement og/eða lime-modified steinefni til að auka frammistöðu m.a. draga úr hjólfaramyndun og innleiða aðferðafræði við hönnun slíkra burðarlaga.
2. Kanna kosti þess að nota froðubik / sementsbundin steinefni til þess að auka frammistöðu (m.a. hjólfaramyndun og þreytubrot) og innleiða aðferðafræði við hönnun.
3. Skilja samhengið eða samfelluna í hegðun óbundins burðarlags, yfir í modified (lítið magn bindiefnis) og að lokum bundins burðarlags.
4. Kanna hvort viðmið Ástrala til togstreitu í bundnu steinefni væri of íhaldssamt fyrir Ný Sjálenskar aðstæður.

Rannsóknin var framkvæmd með hröðuðum álagsprófunum (CAPTIF – Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility) og með því að skoða frammistöðu nokkurra bundinna vegbygginga (Alabaster o.fl. 2013).

Helstu niðurstöður verkefnisins voru (Alabaster o.fl. 2013):

1. Hægt var að sýna fram á að steinefni með 1% sementi dró úr hjólfaramyndun um 200-300% ef borin saman við óbundin burðarlög. Stífni lagsins minnkaði þegar leið á prófunina.
2. Sýnt var fram á að steinefni með froðubiki og sementi dró úr hjólfaramyndun og jók líftímann um 500% borin saman við óbundin burðarlög. Ekki dró úr stífni á meðan á verkefninu stóð.
3. Ekki fékkst betri skilningur á samfelluna, en hins vegar fengust áhugaverður niðurstöður.
 - a. Bundin hegðun fékkst við 3-4% sementsmagn.
 - b. Niðurstöður úr hröðuðum álagsprófunum sýndu að við 4% sementsmagn var lítil hjólfaramyndun (mótstaða gegn hjólfaramyndun jókst um 1000% borið saman við óbundið efni) en stífni lagsins tapaðist. Við lok prófsins var stífnin sú sama og ef 1% sement var bætt við steinefnið.
 - c. Við 3% sementsmagn í felti varð þreytubrot í efninu.
 - d. Niðurstöður prófanna sýndu að best væri að nota 2% sement (ekki brotvaltað), ef meira sementsmagn er notað þá aukast líkur á sprungum og vatn kemst í vegbygginguna og verulega dregur úr líftíma hennar. Einnig er viðhald erfitt. Ef sementsmagnið er undir 2% þá getur stífnin minnkað og frammistaða vegarins minnkar.
4. Hröðuðu álagsprófanirnar sem og mælingar í felti bentu til þess að Ástralíska módelið (Austroads, 2004) passaði síður við Ný Sjálenskar aðstæður heldur en Suður Afríska módelið (Theyse & Muthen, 2001). NZTA hefur gefið út laboratory-based nálgun til þess að hanna bundin burðarlög (Transit, 2008).

Helstu ráðleggingar varðandi notkun froðubiks að verkefninu loknu eru (Alabaster o.fl. 2013):

- Notkun froðubiks á steinefni með 1% sementi bætti frammistöðu vegarins mikið.
- Bæta þarf núverandi hönnunaraðferðir fyrir vegbyggingar með froðubik.

- Froðubik sem hámarka togstyrk efnisins en halda sveigjanleikanum ættu að vera notuð þar sem hætta er á að vatn komist inn í vegbygginguna. Í þessari rannsókn var þó aðeins könnuð notkun froðubiks þar sem 1% sement var í efninu.
- Það var ekki hægt að kanna eiginleika efnisins í endurteknu þríasaprófi.
- Það virtist ekki vera tap á stífni með tímanum.

Helstu ráðleggingar varðandi notkun sements / lime að verkefninu loknu eru (Alabaster o.fl. 2013):

- Endurtekin þríasapróf gátu ekki sagt til um breytingu í hegðun efnisins þegar sementsmagnið fór yfir 1,5%.
- Góð samsvörun var á milli gilda sem fengust við prófanir á rannsóknarstofu og í felti.
- Brotvöltun burðarlagsins minnkaði meðaltals styrk þess um 40%.
- Við 4% sementsinnihald og brotvöltun náði vegbyggingin sér ekki og hegðaði sér eins og sýni sem höfðu 1% sement og voru ekki brotvöltuð.
- Sementsbundnar vegbyggingar eru stífar. Þegar vatni var hleypt á vegbygginguna þá breytist stífnin eins og um óbundið burðarlag væri að ræða, en samt sem áður var frammistaða sementsbundna efnisins betri heldur en óbundna efnisins.
- Þegar prófunum var lokið kom í ljós að sementsbundna lagið var skemmt.
- Efnisstuðullinn sem fékkst upphaflega með falllóðmælingum reyndist sýna vel styrkinn.
- Sementsfesta burðarlagið virtist tapaði stífni jafnt eftir öllum sementsfesta hlutanum í hlutfalli við álag. Hafa skal stífninstapið í huga þegar styrkingar eru hannaðar og mögulega hafa takmarkanir.

Niðurstöður verkefnisins ásamt áframhaldandi vinnu mun auka notkun staðbundinna efni og vonandi auka endurvinnslu núverandi efna. Þetta mun draga úr kostnaði við vegagerð, endurbætur og viðhald án þess að draga úr kröfum um frammistöðu. Styrkt efni hafa tilhneigingu til þess að endast lengur og draga þannig út líkum á endurbyggingu vega. Þær aðferðir sem eru notaðar við styrkingu og endurvinnslu eru framkvæmdar á meiri hraða heldur en endurbygging að hluta eða öllu leyti. Auk þess virðast styrktar vegbyggingar vera betur í stakk búnar til þess að takast á við aukið álag bæði hvað varðar massa sem og fjölda ökutækja og gefa betri frammistöðu í blautum skilyrðum.

2.4 Portland sement

Samtök um Portland sement hafa gefið út leiðbeiningarritið „Guide to Cement-Treated Base (CTB)“ (Halsted o.fl., 2006), en þar er farið yfir hönnun, útlögn og framleiðslu á sementsbundnum burðarlögum. Hér að neðan er stutt samantekt úr ritinu. Sementsbundið burðarlag (CTB) er skilgreint í ritinu sem blanda af náttúrulegu eða framleiddu steinefni með mælanlegu magni af Portland sementi og vatni sem harðnar eftir þjöppun og aðhlúun (curing) og myndar sterkt, varanlegt og frostfrítt vegagerðarefni. Aðferðin hefur verið þekkt lengi og var fyrst notuð 1935 í South Carolina í Bandaríkjunum.

2.4.1 Eiginleikar sementsbundins burðarlags (CTB)

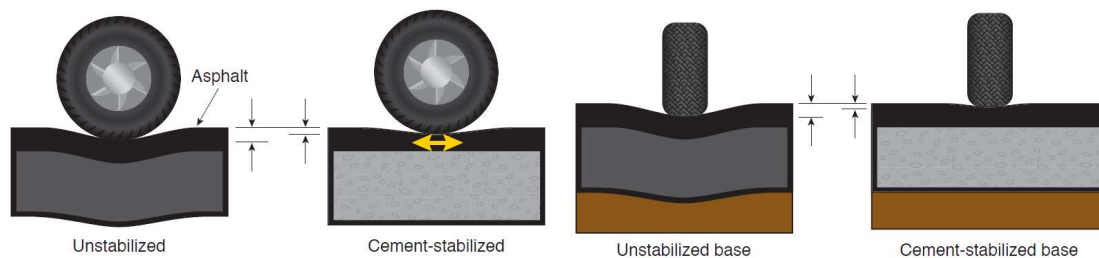
Eiginleikar CTB eru háðir steinefninu, magni sements, skilyrðum við aðhlúun og aldri (Tafla 3).

Tafla 3: Dæmigeðir eiginleikar sementsbundins burðarlags (CTB)

EIGINLEIKI	7-DAGA GILDI
Þrýstipól (compressive strength)	2,1 – 5,5 MPa
Brotstyrkur (Modulus of rupture)	0,7 – 1,4 MPa
Burðargildi, E-gildi (Modulus of elasticity)	4100-6900 MPa
Poisson's gildi	0,15

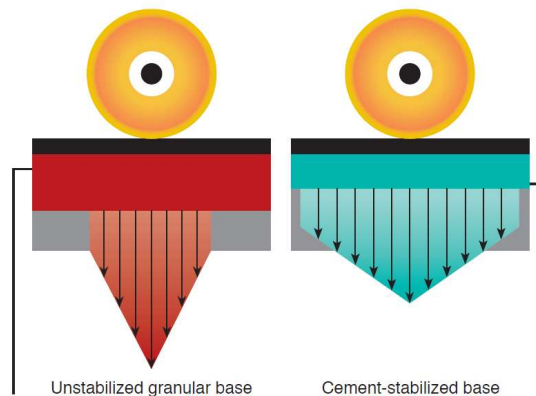
Kostir CTB eru margir en þeir helstu eru (Halsted o.fl., 2006):

- CTB gefur stífara og sterkara burðarlag borið saman við óbundið burðarlag. Stífara burðarlag minnkar niðurbeygjur vegna umferðarálags og minnkar þar af leiðandi streitur í slitlaginu (Mynd 8), sem eykur endingu vegarins.



Mynd 8: Samanburður á niðurbeygjum og hjólfaramyndun í vegi með óbundið og sementsbundið burðarlag (Halsted o.fl., 2006)

- Þykkt sementsbundins burðarlags getur verið þynnra heldur en óbundins burðarlags fyrir sama umferðaálag þar sem álaginu er dreift yfir stærra svæði (Mynd 9). Dreifing álagsins veldur minni spennum á undirlagið og dregur því úr hættu á broti í undirlaginu og ójöfnum og holum á yfirborðinu.



Mynd 9: Spennudreifing óbundins og bundins burðarlags (Halsted o.fl., 2006).

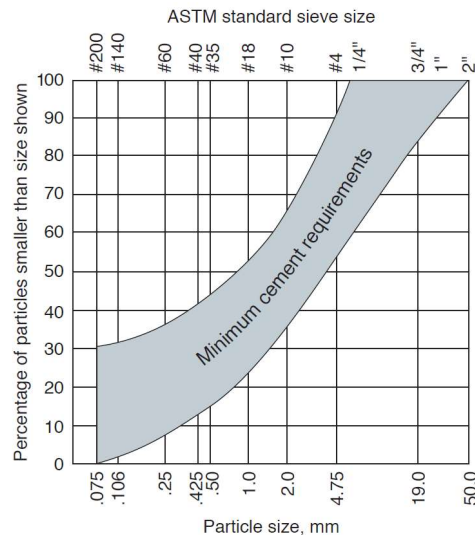
- Hægt er að nota margskonar steinefni, bæði óbundið steinefni sem er í vegi sem og affalsefni iðnaðarframleiðslu.
- Hægt að hafa umferð á vegi á meðan á framkvæmdum stendur.
- Það sem umferð er í sama sporinu dregur úr hjólfaramyndun, þar sem óbundin efni vilja færast til undan álaginu (Mynd 8).

- CTB dregur úr skemmdum vegna vatns í vegbyggingunni þar sem óbundin efni geta dregið í sig meira vatn heldur en sementsbundin efni.
- CTB hentar við mismunandi skilyrði, og á að þola vatn og frost/þíðu sveiflur vel ef rétt hönnuð.
- Styrkur CTB eykst með tímanum þegar sement heldur áfram að hvarfast.

2.4.2 Hönnun sementsbundins burðarlags

Mikilvægt er að vita hvaða fylliefni (steinefni) á að nota sem og kröfurnar sem gerðar eru til framleiðslunnar og loka afurðarinnar til þess að hönnun og ending CTB verði eins og best verði á kosið. Fylliefni sem notað er í CTB má innihalda:

- Samsetningu af mól, klöpp, sandi, silti og leir.
- Samsett efni svo sem kalkefni, hraungjall, gjall, sandstein og ösku.
- Affalsefni náma.
- Hágæða brotin steinefni.
- Gamlar sveigjanlegar vegbyggingar, með klæðingu og óbundnu burðarlagi.



Mynd 10: Kornadreifing fyrir lágmarks sements innihald (Halsted o.fl., 2006).

Til að ná sem bestu sementsmagni og tryggja endingu er ráðlagt að nota fylliefni sem þjappast vel með góða kornadreifingu og mestu steinastærð 7,5 cm. Það tryggir lágmarks aðskilnað í efninu og slétt yfirborð (Mynd 10). Ekki er mælt með því að nota einsleitarn kornakúrfur nema í sérstökum tilfellum þar sem CTB þarf að vera gljúpt. Hins vegar hafa grófar steinefnablöndur verið notaðar og sementsinnihaldið að sama skapi aukið upp að vissi marki þar sem meira sement þarf til að binda mörg fín korn saman borið saman við grófari efni. Nauðsynlegt er að hafa nægjanlegt magn fínefna til að halda grófara efninu saman og mynda þétt og gott burðarlag.

Við hönnun vegbygginga með sementsbundið burðarlag skal tryggja að burðarlagið sé nægjanlega þykkt og sterkt, ef lagið er mjög þunnt og sterkt verður það stökkt og á það til að springa og þreytusprungur að myndast á yfirborðinu. Yfirleitt er reynt að hafa lagið heldur þykkara og minni styrk. Til þess að geta hannað burðarlagið þurfa eftirfarandi upplýsingar að liggja fyrir, styrkur undirlagsins, hönnunartíminn og umferðarþunginn. Hönnunin fer að öðru leyti fram skv. PCA publication Thickness

Design for Soil-Cement Pavements, EB068. Þessi hönnunaraðferð er byggð á rannsóknum, fræðum og prófunum á rannsóknarstofu sem og í folti. Flestar vegbyggingar hafa 150 mm þykkt CTB, en sú þykkt hefur reynst vel á flestum hefðbundnum vegum og léttumferðar flugvöllum.

Miklu máli skiptir að rétt magn vatns og sements sé í blöndunni til að fá gott burðarlag en það gefur einnig mikilvægar upplýsingar til gæðastýringar á framkvæmdatíma. Í PCA ritinu „Soil-Cement Laboratory Handbook EB052“, má finna upplýsingar um prófanir til ákvörðunar á sements og vatns magni sem og þjöppun, en þjöppun er mjög mikilvæg þegar litið er til endingar og styrks CTB. Tryggja verður rétt rakastig þannig að sem best þjöppun náist, ef vatnsinnihald er of lítið er ekki nægur raki til að hjálpa ögnunum í þéttan massa og ef rakinn er of mikill ýtir auka raki ögnunum í sundur.

Vatns, og sementsinnihaldið er skilgreint sem:

$$\text{Vatnsinnihald, } w(\%) = \frac{\text{þyngd vatns í blöndunni}}{\text{þyngd ofnþurrkaðs CTB efnis}} \times 100$$

$$\text{Sementsinnihald, } c(\%) = \frac{\text{þyngd sements í blöndunni}}{\text{þyngd ofnþurrkaðs fyll / steinefnis}} \times 100$$

Magn vatns og sements fer eftir kornadreifingu fylli-/steinefnisins og áætlaðum styrk. Ef blandan er mjög fínefnarík þarf meira sement og vatn þar sem yfirborð steinefnanna er meira. Þegar búið er að finna rétt rakastig til að ná sem bestri þjöppun þarf að gera CTB prufur og mæla þrýstistyrk þeirra. Það er gert fyrir nokkrar mismunandi prósentur sements, og þegar búið er að ákveða sementsmagnið er endanlegt rakastig einnig ákvarðað.

Varast skal að nota meira en 8% sement þar sem skrið getur farið af stað í efninu sem getur valdið sprungumyndun (reflective cracking). Reynslan sýnir að í of sterkum burðarlögum geta komið skriðsprungur í gegnum slitlagið. Yfirleitt er talið nægjanlegt að nota sementsmagn sem gefur um 2,1-2,8 MPa 7 daga styrk þegar verið er að blanda efni á staðnum í núverandi burðarlög þar sem meira er af grófara efni. Hönnunin þarf að vera í jafnvægi, hafa nægt sementsmagn þ.a. burðarlagið sé nægjanlega sterkt og ending sé fullnægjandi ásamt því að efnið sé nokkuð vatnspétt en efnið má ekki vera of sterkt þannig að aðrar brotmyndir verði í vegbyggingunni.

2.4.3 Framkvæmd sementsbundins burðarlags

Framkvæmdin er eins og henni er lýst í kafla 3.1.1. Þegar verið er að framkvæma CTB er markmiðið að blanda vel saman fylliefni við rétt magn af portland sementi og vatni til að hámarka þjöppun. Einnig þarf að tryggja að nægilegur raki sé til staðar til þess að sementið hvarfist á meðan efnið er að harðna. Áður en útlögn efnisins hefst skal tryggja að ekki séu veikir blettir í undirbyggingunni sem geta valdið broti upp í CTB lagið. Mikilvægt er að þjöppun náist áður en efnið fer að harðna og því ráðlagt að vegspottar sem teknir eru fyrir séu tiltölulega stuttir. Mikilvægt er að sementi sé dreift jafnt yfir svæðið sem á að styrkja. Í Tafla 4 má sjá dæmigerð gildi þegar þurru sementi er dreift á óbundið burðarlagsefni í vegi. Yfirleitt er ekki mælt með því að aukavatn sé í fylliefninu en þegar um grófari burðarlagsefni er að ræða kemur smá aukavatn ekki að sök.

Tafla 4: Dæmigert sementsmagn dreift á óbundið burðarlagsefni í feltri (Helsted o.fl. 2006).

Percent cement by weight		Percent cement by volume	Cement spread requirements in pounds per square yard (kg/m ²) for compacted thicknesses				
115 pcf (1842 kg/m ³)	125 pcf (2002 kg/m ³)		5 in. (125 mm)	6 in. (150 mm)	7 in. (175 mm)	8 in. (200 mm)	9 in. (225 mm)
2.5	2.3	3.0	10.6 (5.7)	12.7 (6.8)	14.8 (7.9)	17.0 (9.1)	19.1 (10.2)
2.9	2.7	3.5	12.4 (6.6)	14.8 (7.9)	17.3 (9.3)	19.8 (10.5)	22.3 (11.9)
3.4	3.1	4.0	14.1 (7.5)	16.9 (9.1)	19.8 (10.5)	22.6 (12.1)	25.5 (13.6)
3.8	3.5	4.5	15.9 (8.5)	19.1 (10.2)	22.2 (11.8)	25.4 (13.6)	28.7 (15.4)
4.2	3.9	5.0	17.6 (9.4)	21.2 (11.3)	24.8 (13.3)	28.2 (15.1)	31.8 (17.0)
4.7	4.3	5.5	19.4 (10.3)	23.3 (12.4)	27.2 (14.6)	31.0 (16.5)	35.0 (18.7)
5.2	4.7	6.0	21.2 (11.3)	25.4 (13.6)	29.6 (15.8)	33.9 (18.1)	38.1 (20.4)
5.6	5.1	6.5	21.9 (11.7)	27.5 (14.7)	32.1 (17.1)	36.6 (19.6)	41.2 (21.9)
6.0	5.6	7.0	24.7 (13.2)	29.6 (15.8)	34.6 (18.5)	39.5 (21.1)	44.4 (23.7)
6.5	6.0	7.5	26.5 (14.2)	31.7 (16.9)	37.0 (19.8)	42.3 (22.5)	47.6 (25.4)
7.0	6.4	8.0	28.2 (15.1)	33.8 (18.0)	39.5 (21.1)	45.1 (24.1)	50.8 (27.2)
7.4	6.9	8.5	30.0 (16.0)	36.0 (19.2)	42.1 (22.4)	48.0 (25.6)	54.2 (28.9)
7.9	7.2	9.0	31.8 (17.0)	38.1 (20.4)	44.6 (23.7)	50.8 (27.2)	57.6 (30.7)
8.4	7.7	9.5	33.5 (17.9)	40.2 (21.5)	47.1 (25.1)	53.6 (28.6)	59.8 (31.9)
8.9	8.2	10.0	35.2 (18.8)	42.3 (22.5)	49.5 (26.5)	56.4 (30.1)	62.0 (33.4)

Til þess að tryggja góða blöndun efnis má grafa prufuholur í styrkta lagið og kanna dreifingu sements og vatns. Hægt er að hraða ferlinu með því að bleyta fylliefnið áður en sementi er dreift en þá þarf að tryggja að vatnið sé dregið frá við síðari blöndun. Það er talið gefa betri festun á milli steinefnis og sements og lágmarka uppgufun vatns eftir blöndun. Eftir þjöppun á loka afurðin að vera þétt, laus við sprungur, hryggi og laust efni. Nauðsynlegt getur reynst að vökva burðarlagið í allt að 7 daga eftir útlögn eða halda raka að burðarlaginu með öðrum aðferðum t.d. biklagi. Í sumum tilfellum getur reynst nauðsynlegt að saga þverrákir eða samskeyti í CTB.

Leggja skal slitlag á CTB um leið og það telst hagkvæmt, en hægt er að leggja slitlagið um leið og burðarlagið er orðið stöðugt (4-48 tímar eftir útlögn) en dæmi er um að beðið sé í einhverjar vikur. Hleypa má umferð á burðarlagið á sama tíma en ef mikil þungaumferð er um veginn er mælt til að bíða í 7 daga. Tryggja skal að burðarlagið sé vel „þrifið“ áður en slitlag er lagt á það.

CTB mun skriða á meðan það er að harðna. En með vel hönnuðum vegbyggingum og vel gerðri framkvæmd ættu sprungur af þessum völdum ekki að hafa áhrif á frammistöðu vegarins. En stórar sprungur í burðarlagi geta leytað upp á yfirborið og orðið til ama ef ekki er haldið rétt á spilunum. En einnig er hægt að framkvæma smásprungur (brotvöltun) eða hafa millilag til að taka upp þessar spennur.

3 FESTUN Á ÍSLANDI

Gerðar hafa verið þó nokkrar skýrslur um festun burðarlaga á Íslandi sem og kröfur settar fram í leiðbeiningarritum (Þórir Ingason, 1993; Karsten Iversen, 1995; Njörður Tryggvason, 1996a & 1996b; Þórir Ingason o.fl., 2000; Þórir Ingason, 2004; Kristján Ingi Arnarsson, 2011; Ingvi Árnason o.fl. 2012; Einar Gíslason o.fl., 2013; Vegagerðin, 2017 & 2013).

„Bik- eða sementsfestun burðarlags getur verið nauðsynleg ef umferðaralag er mikið á veginum, en kemur einnig til greina ef burðarlagsefnið uppfyllir ekki kröfur um kornadreifingu“ (Vegagerðin, 2017). Festun er ætlað að binda fínefni í burðarlagi, þar sem fínefnainnihald er oft hátt. Steinefni brotnar oft niður vegna umferðaralags og þegar fínefnainnihald burðarlagsins er orðið of hátt verður efnið vatnsdrægt og oft frostnæmt. En einnig má festa burðarlag ef efnisgæði steinefnis er ekki nægjanlega gott (Ingvi Árnason o.fl., 2012). Minnst er á að aðstæður ráða því hvaða aðferð verði fyrir valinu. Ef auka þurfi burð í fínefnasnauðu efni sé rétt að nota bikþeytu og froðubik henti þá fínefnaríkari efnunum betur. Sement sé aftur á móti notað þar sem þörf er á sérstaklega sterku burðarlagi. Óháð því hvaða efni sé notað, þ.e.a.s. bikþeyta, froðubik eða sement þurfi að gera prófblöndur til að fá upplýsingar um væntanlega eiginleika bundna efnisins og þar með talið burðarþol en einnig hversu mikið bindiefni þurfi að nota í hverju tilviki fyrir sig. Einnig getur verið ástæða til að kanna aðra eiginleika efnisins s.s. þjöppunareiginleika við mismunandi rakastig (Proctor próf), CBR próf ef frekari upplýsinga er krafist og ef hanna skal vegbygginguna með MEPD (Mechanistic-Empirical Pavement Design) hönnunaraðferðum þarf að framkvæmd kvik þríðásapróf. Annars fylgja steinefnaprófanir hefðbundnu ferli skv. leiðbeiningarritum Vegagerðarinnar (Vegagerðin, 2017).

Ef bikblanda skal efni í stöð, skal taka sýni til að mæla bikinnihald, þjappa kjarna og mæla kleyfnibrotþol þeirra, a.m.k. einu sinni í hverju verki. Ef bæta á við sementi í stöð til styrkingar eru tekin sýni, þau þjöppuð í mót og rúmþyngd og þrýstibrotþol eftir 7 daga mælt. Þegar burðarlög eru bundin með biki eða sementi í felti skal taka sýni af efninu til að meta hversu vel blöndun bindiefnis við steinefni hefur tekist sem og magn bindiefnis. Taka skal eitt sýni úr hvorri akrein eftir íblöndun bindiefnis og jöfnunar með hefli en áður en þjöppun fer fram. Þegar efnið er fræst og bikfest skal mæla bikinnihald og blöndun þess á rannsóknarstofu. Einnig skal þjappa kjarna úr hluta af sýnum og mæla kleyfnibrotþol, til þess að hægt sé að meta líklegan styrk burðarlagsins. Sérstaklega skal fylgjast með gæðum froðubiks. Þegar sementi er blandað við burðarlagsefni skal steypa kjarna úr sýninu og kanna þrýstibrotþol sýnisins eftir 7 daga hörðnun (Vegagerðin, 2017). Þegar burðarþol vegbygginga er reiknað er oft notast við

álagsdreifingarstuðul. Álagsdreifingarstuðullinn fyrir bikfest burðarlag er oft milli 1,5 og 1,75 en fyrir sementsbundið efni má reikna með 2,25 (Vegagerðin, 2013).

Í framkvæmd festunnar verkefna þarf að passa að fræsa ekki niður í styrktarlagið ef í því eru stærri staksteinar. Það getur skemmt tennur í fræsanum sem og geta komið upp vandamál við jöfnun og þéttleika yfirborðsins sem og rákir og hreiður geta myndast ef massinn er of grófur.

Vegna verðs á biki hefur sementsfestun verið hagkvæmasta festunaraðferðin undan farin ár. Bik hefur verið í kringum 4 sinnum dýrara heldur en sement. Þrátt fyrir hærri prósentu sements, oft í kringum 5,5%, miðað við bik, sem er oft í kringum 3,8%, er festun með sementi ódýrari heldur en festun með biki (Ingvi Árnason, 2017).

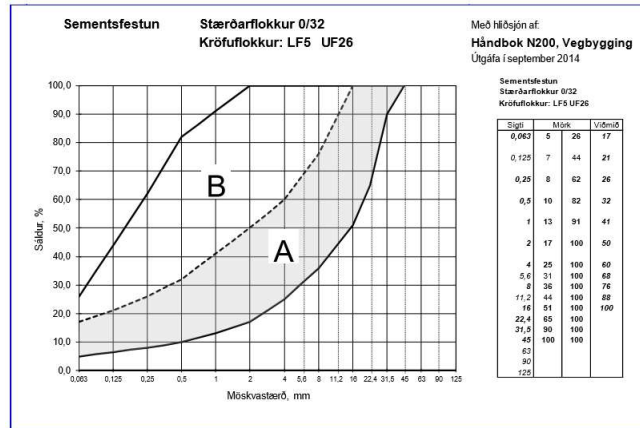
3.1 Sementsfestun

Sementsbundin burðarlög eru yfirleitt notuð á umferðarmikla vegi. Hér á landi hefur hún verið meira notuð til þess að styrkja eldri burðarlög en er þó þekkt í nýjum burðarlögum. Hægt er að framkvæma sementsfestun með tvennum hætti, annars vegar að fræsa, dreifa bindiefni, blanda, vökva, þjappa og aðhlúun eða að keyra burðarlagsefnið í gegnum steypustöð blanda það sementi og leggja með malbikunarvél (Njörður Tryggvason, 1996). Hérna verður ekki frekar fjallað um síðari kostinn þar sem hann er minna notaður og ekki eins æskilegur í viðhaldsverkefnum. Sementsfestun virðist hafa reynst vel á Íslandi og aðlagar hún sig vel að þeim miklu sveiflum sem geta orðið í raka og kornadreifingu festulagsins, en hægt er að mæta sveiflum með breyttu sementsmagni og raka á staðnum.

Eftirfarandi kröfur eru gerðar til sementsbundinna burðarlaga (Vegagerðin, 2017). Æskileg kornadreifing fyrir steinefni sem á að sementsbinda er sýnd á Mynd 11. Á myndinni eru marklínur A og B, en æskilegast er að efnið lendi innan marklínu A en einnig má nota efni innan marklínu B en þá er ráðlagt að nota heldur meira sementsmagn til festunar. Aðrar kröfur sem gerðar eru til steinefnisins eru eins og fyrir óbundin burðarlög. Mikilvægt er að gera prófblöndur með því steinefni sem á að festa hverju sinni til ákvörðunar á sementsmagni. Vatns/sements- tala efnisins skal vera $0,8-1,0 \pm 0,2\%$ og 7 daga brotstyrkur sýna $5 \pm 0,8$ MPa (síváningar 150 mm í þvermál og 150 mm að hæð). Sementsbundin burðarlög skulu ná þjöppun sem samsvarar mældri rúmþyngd með geislaþæmi sé 97 % af mældri rúmþyngd kjarna sem þjappaðir eru með Kango-hamri á rannsóknarstofu. Miðað er við að þjöppun sé lokið á innan við 4 klst ef hiti er á bilinu $5-10^\circ\text{C}$ en 3 klst ef hann er meiri en 10°C . Sementsmagn sem notað er við fræsinguna og festun skal ekki hafa meira frávik en ± 1 kg/m². Þessar kröfur svipar mjög til þeirra krafna sem settar eru fram í N200 handbókinni í Noregi (Statens vegvesen, 2014a).

Sementsmagn í framkvæmdum sem þegar hafa verið gerðar á Íslandi virðast vera nokkuð stöðugar (Njörður Tryggvason, 1996b; Vegagerðin, 2015 & 2016, Guðmundur I. Waage, 2011):

- Langidalur – þykkt festunnar 150 mm, sementsmagn 19 kg/m², 7 daga þrýstipól ≥ 5 MPa.
- Víðidalur – sement 5% sement af þurri rúmþyngd burðarlags. Þykkt festunnar 150 mm, sementsmagn 16,7 kg/m².
- Hörgárdalur – sement 5,5% sement af þurri rúmþyngd burðarlags. Þykkt festunnar 150 mm, fræðilegt magn sements 18,4 kg/m², en heldur mikið sement fór í veginn eða 19,5 kg/m².
- Baraðastrandarvegur, hringvegur 1-h0, – þykkt festunnar 170 mm, sementsmagn 21 kg/m², 28 daga brotþól ≥ 7 MPa.



Mynd 11: Marklínur fyrir sementsfest burðarlög (Vegagerðin, 2017).

3.1.1 Framkvæmd sementsfestunnar

Þegar verið er að styrkja núverandi veg er einn möguleikinn að sementsfesta burðarlag vegarins og auka þannig styrk burðarlagsins. Áður er verkið hefst er nauðsynlegt að framkvæma grunnrannsóknir á efninu sem skal festa. Taka skal sýni úr veginum á 500-700 metra bili, kanna þarf kornakúrfu efnisins og ákvarða hagstæðasta rakastig og sementsmagn til þess að óskaður styrkur festunarinnar náist. Framkvæmd sementsfestunnar í núverandi vegi má skipta upp í 6 skref en sjöunda skrefið eru rannsóknir og prófanir (Einar Gíslason o.fl. 2013):

Þurrfræsing – núverandi vegur er þurrfræstur og steinefni bætt við ef þurfa þykir. Þegar þurrfræsing er lokið er efninu jafnað með hefli og það valtað eina umferð. Gæta skal að því að þurrfræsingin sé 30 mm grynri heldur en endanleg festunarþykkt (Mynd 12).



Mynd 12: Þurrfræsing er fyrsta skref sementsfestunnar

Blöndun – sementi er dreyft jafnt yfir veginn og strax í kjölfarið er efninu blandað saman með fræsun og það vökvað (Mynd 13).



Mynd 13: Blöndun sements við steinefnið.

Heflun – um leið og blöndun er lokið skal efnið jafnað í rétta hæð með veghefli, og það tryggt að yfirborðið sé slétt í þver- og langátt (Mynd 14).



Mynd 14: Heflun efnisins um leið og blöndun þess er lokið

Völtun – hefja skal völtun með stáltromluvaltara um leið og hefillinn hefur rifið upp efnið.

Brotvöltun – Um það bil 24-48 klst eftir íblöndun steinefnis og sements skal brotvalta veginn með a.m.k. 10 tonna þungum vibravaltara.

Yfirborðsfrágangur – halda skal yfirborðinu röku í a.m.k. 7 daga eða loka því með yfirlögn slitlags. Áður en slitlag er lagt á veginn þá verður að gera við yfirborðsskemmdir með sementsblönduðum sandi.

Til þess að sannreyna að sementsfestunin hafi tekist eins og til var ætlast skal kanna 28 daga brotstyrk efnisins. Það er gert með sýnatöku, en kjarna skal taka úr veginum með 500 m millibili og skulu kjarnarnir vera teknir jafnt á báðum akreinum. Sýnatökunni skal vera lokið 42 dögum eftir festun og sýni brotin við fyrsta tækifæri á viðurkenndri rannsóknarstofu. Þar eru sýnin brotin og leiðrétt miðað við 28 daga brotstyrk, en 28 daga brotstyrkur efnisins skal vera 7 MPa.

3.2 Bikfestun

Frá árinu 1991 hefur Vegagerðin þróað aðferðir til þess að styrkja burðarlög með íblöndun biks. Mismunandi aðferðir hafa verið prófaðar (Þórir Ingason o.fl. 2000; Þórir Ingason, 2004):

- Fræst upp úr gömlum vegi og blandað með biki á staðnum.
- Bik verið blandað við steinefni úr námum í blöndunarstöðum og efnið svo lagt með malbiksvél.
- Biki blandað í efnið um leið og það er lagt út (þarfnast „midland-mix paver“).
- Bik látið smjúga niður í púkk (biksmygið púkk).

Froðubik og bikþeyta hafa verið notuð og grunnbik með mismunandi stífleika prófaðar (Þórir Ingason o.fl. 2000).

Þórir Ingason o.fl. (2000) skoðuðu valda kafla sem höfðu verið festir með biki, og síðan var gert rannsóknarverkefni með bikþeytur og froðubik á Ólafsfjarðarvegi (Þórir Ingason, 2004). Eftirfarandi niðurstöður eru skráðar:

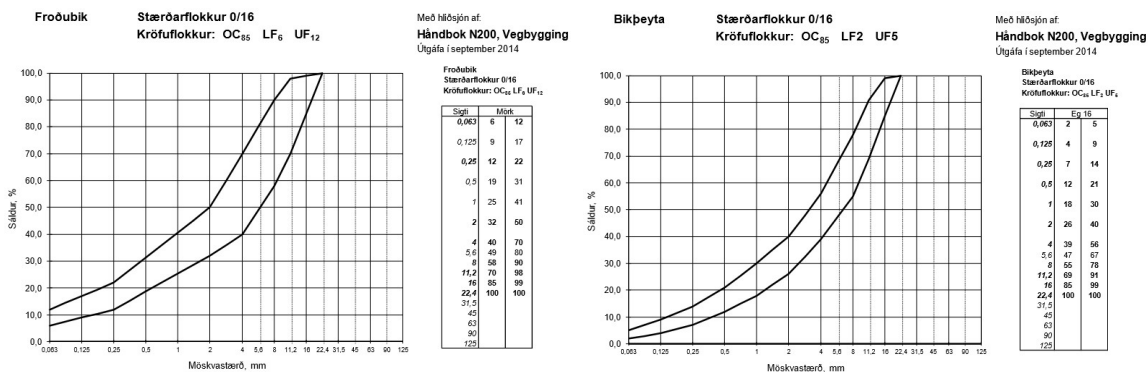
- Ef vegur er fræstur upp og festur ætti lágmarks festunarþykkt að vera 10 cm.
- Ekki var hægt að greina afgerandi mun á milli aðferða, en mismun er hægt að finna milli mismunandi landsvæða. Talið er að mismunandi steinefnagerð ráði þar mestu frekar en tegund bindiefnis.
- Sjónrænt mat greinir ekki mun á froðubiki eða bikþeytu í fræsingu og festun eða blöndun í námu. Froðubik krafðist minna umstangs í framleiðslu, en það hefur breyst. Ráðlagt var að hanna bikþeytuna fyrir hvert fræsingar verkefni þar sem mismunandi steinefni kallaði á mismunandi gerðir bikþeytu. Ný ýruefni fyrir bikþeytur hafa leyst þetta vandamál og gengur sama bikþeytan fyrir mismunandi steinefnagerðir.
- Sjónrænt mat greinir ekki mun á mjúku eða stífu grunnbiki í bikþeytur og froðubik. Ef burðarlagsefni er blandað í námu og síðan lagt út, er heppilegra að nota mjúkt grunnbik þar sem geyma þarf efnið eftir blöndun áður en það er lagt.
- Froðubikskafar virðist þurfa meiri völtun heldur en bikþeytukafar. Reynt er að loka yfirborði og pumpast fínefni upp með valtanum þar sem froðubik var notað.
- Nokkur aðskilnaður var í efninu þegar froðubik var notað á meðan bikþeytan sýndi ekki aðskilnað. Efnið sem verið var að styrkja var sand og fínefnaríkt með töluvert af hnefastórum steinum.
- Minni blöndun virtist vera í efri hluta þverhalla miðað við neðri hlutann.
- Bikþeyta hentar fyrir fínefnasnauðara efni heldur en froðubik. Talið er að froðubik þurfi ákveðið magn fínefnis til að tryggja dreifingu bindiefnisins.
- Bikfestun hjálpar á þáatíma í samanburði við óbundið burðarlag. Froðubik virðist ekki vera eins næmt fyrir árstíðasveiflum og bikþeyta, jafnvel allt að 5 árum eftir útlögn.
- Burðarþol bikfesta burðarlaga er „lítið“ strax eftir byggingu, burðarþolið eykst svo árið eftir og heldur sér. Styrkur er talin nást fyrr með bikþeytu borið saman við froðubik, sérstaklega ef lagt er seint að sumri eða hausti.
- Stíft grunnbik mælist hærra í burðarþoli en munurinn er ekki tölfræðilega marktækur.
- Kleyfnibrotþol bikþeytu með minna bikinnihaldi var lægra heldur en með meira bikinnihaldi en burðarþol kaflanna reynist vera svipað. Ekki er samræmi á milli þessara stuðla.
- Við lagningu biksmygins þúkkst með malbiksvél reyndist erfitt að fá lang- og þversamskeyti góð. Einnig þoldi efnið enga umferð áður en biki var sprautað yfir það. Ekki var hægt að rétta efnið af með hefli þ.a. útlögn malbiksvélarinnar varð að heppnast. Ekki hefur gengið að leggja þúkk sem styrkingarlag með hefli.
- Bikfestun er viðkvæm fyrir rigningu við útlögn.
- Þegar bikþeyta er notuð er mikilvægt að kanna rakastig efnisins, ef það er of hátt getur verið erfitt að festa það með bikþeytu vegna þess að aukavatnið sem kemur með henni getur valdið því að efnið verði óstöðugt. Það má heldur ekki vera of lítið vatn því þá vill bikþeytan „brotna“ of fljótt (Vegagerðin, 2017).
- Froðubik er talin ódýrari kostur.
- Val milli mismunandi aðferða er hugsanlega tengt aðstæðum hverju sinni og samanburði á kostnaði.

Á Mynd 15 eru sýndar leiðbeinandi markalínur fyrir bikbundin burðarlög blönduð í námu, en aðrar steinastærðir má finna í leiðbeiningarriti Vegagerðarinnar (Vegagerðin, 2017). Markalínurnar eru

leiðbeinandi þar sem víkja má frá mörkum, ef blandan stenst kröfur um kleyfnibrotþol. Aðrar kröfur sem gerðar eru til steinefnisins eru eins og fyrir óbundin burðarlög. Miða skal miða við að kleyfnibrotþol bikbundinna efna sé meira en 100 kPa, sem samsvarar álagsdreifingarstuðli $a=1,75$. Hægt er að reikna álagsdreifingarstuðulinn út frá líkingunni:

$$a = 0,38 \cdot \sqrt[3]{p}$$

þar sem p er kleyfnibrotþolið við 25 °C. En þetta er reynslujafna frá Noregi. Fylgst er með þjöppun bikbundins burðarlags með geilsamæli eða þjöppunarmælis í valta og er þjöppunin ásættanleg þegar breytingar á rúmpýngd milli umferða er orðin minni en 5%, eða þegar kröfum um rúmpýngd er náð. Blöndun er ekki nægilega góð ef munur á mesta og minnsta mælda bikinnihaldi er meiri en 1,2%. Rúmmál froðubiks skal 12 til 18 faldast, og má ekki helmingast fyrr en eftir að minnsta kosti 15 sek. Við fræsingu og festun skal frávikið í bikmagni ekki vera meira en $\pm 0,4\%$ fyrir hvern 18-20 tonna farm, og ekki meira en $\pm 0,2\%$ fyrir verkið í heild (Vegagerðin, 2017).



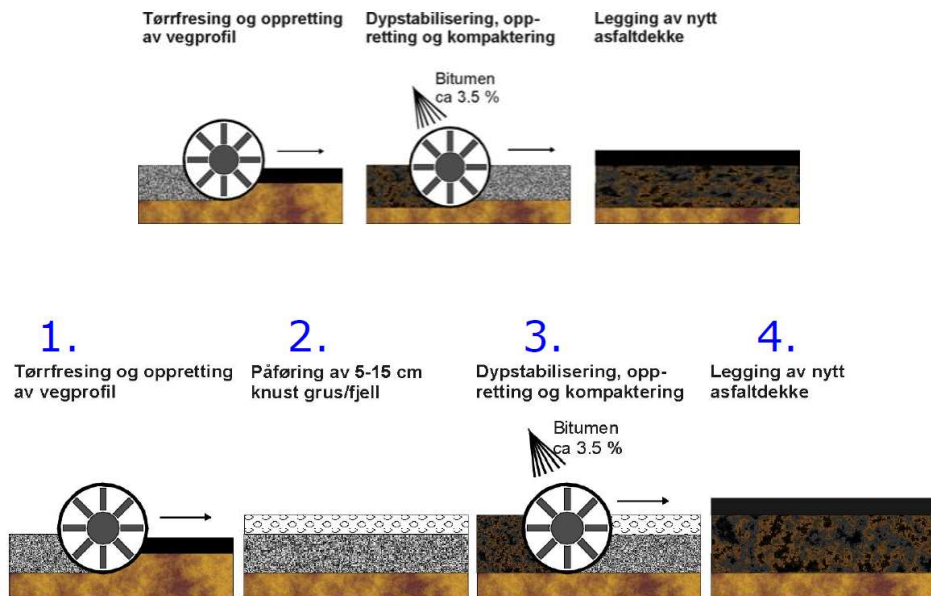
Mynd 15: Markalínur steinefnis (leiðbeinandi) fyrir froðumalbik og bikþeytu blandað í námu (Vegagerðin, 2017).

3.2.1 Framkvæmd bikfestunnar

Framkvæmd bikfestunnar svipar mjög til festunar með sementi. Fyrst er efnið fræst, síðan blandað bindiefnum og vegurinn síðan jafnaður með veghefli og valtaður. Aðferðafræðin á Íslandi svipar til norsku aðferðarinnar sem er sýnd á Mynd 16. Nokkur atriði varðandi bikþeytur og froðubik sem Ingvi Árnason (2017) benti á :

- **Froðubik**
 - Blöndun byggir á háaum hita biks (180°C).
 - Vatni/lofti er blandið við bikið undir þrýstingi þ.a. þegar bikinu er sprautað út þá freyðir það og margfaldar rúmmál sitt.
 - Þegar bikinu er sprautað er það þunnt og gefur góða viðloðun við fínkorna efni, en grófari hluti efnisins tekur minna til sín af biki.
 - Efnið er laust við vatnsdrægni.
 - Efnið er meðfærilegt í vinnslu og yfirborðsáferð jafnan góð.
 - Klæðingum hættir til að blæða, yfirborðið er mjúkt og þess vegna hættir steinefni úr klæðingunni til að ganga niður í undirlagið við mikið álag þungra bíla.
- **Bikþeyta**
 - Bikið er „kalt“ eða um 60-70°C.
 - Auðvelt í blöndun og jöfn dreifing biksins um steinefnið, yfirleitt öll korn vel þakin.
 - Efnið er auðvelt í meðhöndlun fyrst eftir blöndun en verður óþjálma með tímanum.

- Ef rignir ofan í bikþeytumöl á meðan á framkvæmd standur, þarf að loka svæðinu fyrir umferð eða hylja yfirborðið með mól, annars verða bílar þaktir biki.
- Bikþeytan er dýrari heldur en froðubikið.



Mynd 16: Framkvæmd bikfestunnar í Noregi (Refsdal, 2007)

Best er að framkvæma bikfestun fyrri hluta sumars. Aukavatn sem er í blöndunni fær þá tækifæri til þess að komast í burtu, annars er hættu á að of mikið vatn sé í efninu og sprungur myndist vegna frost/þíðu áraunar. Þetta aukavatn veldur því einnig að ekki er gott að leggja þétt slitlag fyrir heldur festunin hefur fengið að „anda“ í nokkra daga. Ef notuð er bikþeyta þarf að áætla lengri þurrktíma heldur en ef froðubik er notað vegna hins mikla vatnsinnihalds í bikþeytunni. Ef notað er froðubik er hægt að fræsa efnið aftur og láta „lofta“ um það til þerris. Styrkur efnisins eykst samhliða því að vatnið fari úr því og þannig líður oft langur tími þar til fullum styrk er náð. Ekki er ráðlagt að hleypa mikilli umferð á óvarið burðarlag einkum ef rignir (Vegagerðin, 2017; Þórir Ingason o.fl. 2000).

4 ATHUGUNARSTAÐIR

Sex kaflar voru skoðaðir sérstaklega:

- Inní Borgarfirði við Gljúfurá (1-g9/1-h0 stöðvar 8.370-9.120/0-2.940) var sementsstyrkt sumarið 2015. Kaflinn var falllóðsmældur fyrir og eftir styrkingu og tekin voru sýni úr veginum til að gera kornakúrfu, mæla brothlutfall, kleyfnistuðul og framkvæma Los Angeles próf. Hluti af efninu var blandaður sementi og steypir í kjarna, brotstyrkur þeirra var borin saman við sýni tekin úr veginum.
- Á Skálholtsvegi (31-01 stöðvar 6740-9310) var verið að laga legu vegarins og leggja nýja klæðingu sumarið 2015. Vegurinn var þurrfrætur, keyrt í hann efni og lögð ný klæðing. Engin festing átti sér stað og er hann því notaður sem samanburðarkafli við festu kaflana. Vegspotinn var falllóðsmældur fyrir og eftir endurlögn og tekið var sýni úr veginum til að gera kornakúrfu, mæla brothlutfall og kleyfnistuðul. Til að laga þverhalla og ójöfnur í veginum var keyrt í efni úr námu við Merkurlaut.
- Á Biskupstungnabraut (35-01 stöðvar 48-1328 og 3082-4336) voru teknir kjarnar úr bikbundnu burarlagi sem var fest með bikþeytu sumarið 2006 og styrkur þeirra mældur. Falllóðsmælingar fyrir og eftir styrkingu voru skoðaðar.
- Á Barðastandavegi (62-05 st. 6.776-10.520 / 11.895-12.200) var vegurinn þurrfræstur, festur með sementi og hæðarlega og þverhalla aðlagðir haustið 2016. Að lokum var lögð klæðing á veginn. Falllóðsmælingar fyrir og eftir festun hafa verið skoðaðar og til stendur að taka kjarna úr festuninni. Því miður láðist verktaka að láta rannsakendur vita um fyrirætlanir sínar þ.a. ekki náðist að fá efnissýni úr fræsingunni.
- Á Ólafsfjarðarvegi við Fagraskóg (82-02) var gerð tilraun með bikfestun haustið 2001. Teknir voru fyrir 3 kaflar þar sem annars vegar var notuð 2,4 og 3,8% bikþeyta og hins vegar 3,8% froðubik. Búið er að bera saman falllóðsmælingar af köflunum og skoða árangur mismunandi festunnar. Til stendur að taka kjarna úr veginum sumarið 2017 og kanna styrk sýnanna.
- Í Víðidal og Hörgárdal (1-k6; 1-k7 og 1-p3/p4) var sementsfestun sumarið 2010. Í Víðidal var notað 5% sement á meðan 5,5% voru notuð í Hörgárdal. Til eru kjarnar úr vegunum sem hafa verið prófaðir sem og falllóðsmælingar fyrir og eftir festun. Til stendur að falllóðsmæla þessa vegi aftur sumarið 2017.

Auk vegkaflanna tilgreinda hér að ofan voru falllóðsmælingar skoðaðar fyrir aðra vegspotta á Norðurlandi, Vesturlandi og Suðurlandi. Þessir vegkaflar eru ýmist sementsstyrktir, bikfestir eða endurbyggðir að hluta með óbundnu burðarlagi. Bornar voru saman mælingar fyrir og eftir endurbætur og árangurinn meinn.

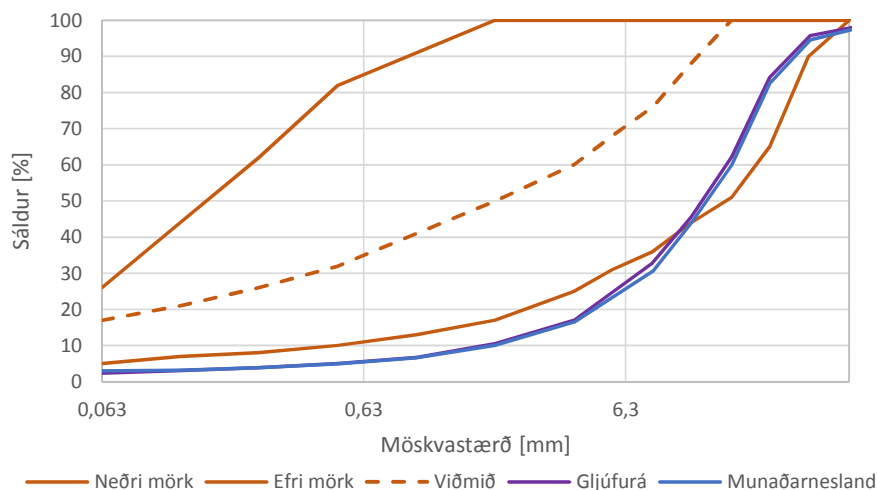
4.1 Sementsstyrking í Borgarfirði

Í Borgarfirði við Gljúfurá var tæplega 4 km vegkaflur sementsstyrktur sumarið 2015, Mynd 17. Til að kanna áhrif styrkingarinnar var vegurinn falllóðsmældur fyrir og eftir styrkingu en einnig voru tekin sýni úr veginum til þess að hægt væri að bera eiginleika steinefnisins við þá eiginlega sem taldir eru æskilegir samkvæmd leiðbeiningarritum Vegagerðarinnar. Gerð var kornakúrfa, brothlutfall og kleyfnistuðul metin og Los Angeles próf framkvæmt. Þrjú kjarnar voru sementsbundnir og brotstyrkur þeirra mældur þannig að hægt væri að bera styrkinn saman við kjarna sem teknir voru úr veginum.



Mynd 17: Sementsfestun burðarlags í Borgarfirði

Tvær kornakúrfur voru fengnar úr tveimur sýnum, annað tekið við brúnna við Gljúfurá og hitt fyrir ofan afleggjarann að Munaðarneslandi. Þessar tvær kornakúrfur eru settar inná viðmiðunar kornakúrfur Vegagerðarinnar (Mynd 18) og þar sést berlega að töluvert vantar uppá fínefnainnihald burðarlagsins sem var sementsbundið. Þrátt fyrir að kornakúrfa burðarlagsins samræmist ekki viðmiðunarkúrfunni sýna falllóðsmælingar greinilega styrkingu við sementsfestunina.



Mynd 18: Viðmiðunarkornakúrfa Vegagerðarinnar ásamt kornakúrfum fengnum við Gljúfurá og Munaðarnesland

Kleyfnistuðull efnisins var 16%, sem stenst fyllilega kröfur sem settar eru upp í leiðbeiningarriti Vegagerðarinnar þar sem hámarks kleyfnistuðullinn er 20% þar sem árdagsumferð þungra ökutækja er meiri en 400, en þar sem fjöldinn er minni en 10 er hámarks kleyfnistuðulinn 35%.

Brothlutfall efnisins var einnig mælt (Tafla 5) og fékkst $C_{80/1}$, en samkvæmt leiðbeiningarriti Vegagerðarinnar á hlutfall efnisins sem er brotið að vera hærra en 90% fyrir malað harpað grjót og minna en 3% alnúið. Þetta gildir fyrir árdagsumferð þungra bíla hærri en 400 og 100. Efnið sem við erum með er undir mörkum þess efnis sem skal vera brotið en stenst kröfur um efnismagn sem er alnúið.

Los Angeles próf gaf LA-gildi uppá 13,5% sem uppfyllir kröfur leiðbeiningarrits Vegagerðarinnar fyrir árdagsumferð þungra bíla yfir 400. LA-gildið skal vera minna en 20% fyrir 3.flokks efni sem er mjög ummyndað samkvæmt berggreiningu og minna en 25% fyrir 3.flokks efni sem er ferskt, fínblöðrótt basalt samkvæmt berggreiningu.

Tafla 5: Brothlutfall efnisins sem var sementsstyrkt

KORNASTÆRÐARBIL [mm]	HLUTFALL HEILDARSÝNIS [%]	C_c – HLUTI BROTINS EFNIS [%]	C_{TR} – HLUTI ALRÚNNNAÐS EFNIS [%]
4-8	15,9	88	2
8-16	29,2	73	2
16-32	33,7	82	1
Brotstig, vegið meðaltal	-	80	1

4.1.1 Sementsbundnir kjarnar

Þrjú kjarnar voru byggðir upp með 7% raka, 5% sementsmagni og 96% proctor þjöppun til að kanna brotstyrk þeirra, en samkvæmt útboðsgögnum átti brotstyrkurinn að vera að lágmarki 7 MPa en í leiðbeiningarriti Vegagerðarinnar er miðað við 5 MPa lágmarksstyrk. Niðurstöður prófanna voru langt undir mörkum en talið er að of mikið vatnsinnihald hafi spilað þar stóran þátt, ásamt þeirri staðreynd að efnið sem verið var að binda var frekar fínefnasnautt. Niðurstöður prófanna má sjá í Tafla 6, en brotþol kjarnanna var einungis um 3 MPa. Fyrsti kjarninn sem var prófaður var ekki mjög þéttur og ekki talin gefa nákvæma mynd af brotstyrknum.

Tafla 6: Brotþol uppbyggðra kjarna

	BROTÞOL [MPA]
KJARNI 1	2,39
KJARNI 2	3,09
KJARNI 3	3,06

Borkjarnar voru teknir úr veginum á 6 stöðum (Mynd 19) og þeir brotnir á Nýsköpunarmiðstöð Íslands, niðurstöður prófananna má sjá í Tafla 7. Ekki tókst að ná heilum kjarna á einum stað af sex, en þar komu sýnin brotin upp. Á stað 2 voru teknir tveir kjarnar, annar 80 mm í þvermál og hinn 144 mm. Þetta var gert til að meta hvort þvermál sýnisins hefði mikil áhrif á styrkinn þar sem 144 mm sýni hefur nánast sömu hæð og þvermál. Kjarni 2b hefur greinilega meiri styrk heldur en 2a sem gefur til kynna að styrkur breiðara sýnisins með lægri hæð / þvermál stuðul sé hærri eins og við mátti búast, en erfitt er að alhæfa út frá niðurstöðum eins sýnis. Meðaltals brotþol allra þessara kjarna er 5,4 MPa sem er

töluvert lægra heldur en lágmarksstyrkur sem kveðið er á um í útboðsgögnum uppá 7 MPa en stenst viðmiðunarkröfur tilgreindar í leiðbeiningarriti Vegagerðarinnar. Aðeins einn kjarni (númer 4) nær tilskildum styrk, 7 MPa, tilgreindur í útboðsgögnum.

Tafla 7: Brotþol kjarna sem teknir voru úr veginum

	STÖÐ	HÆÐ / ÞVERMÁL	LEIÐRÉTTINGARSTUÐULL	BROTÞOL [MPA]
KJARNI 1	G9-8620 / HK	1,56	0,96	5,27
KJARNI 2A	G9-9118 / VK	1,90	0,99	4,43
KJARNI 2B	G9-9118 / VK	1,09	0,89	5,75
KJARNI 3	H0-496 / HK	2,25	1,00	5,14
KJARNI 4	H0-999 / VK	2,16	1,00	7,18
KJARNI 5	H0-1501 / HK		ÓNOTHÆFUR, KOM BROTINN UPP	
KJARNI 6	H0-2023 /VK	1,78	0,98	4,67



Mynd 19: Kjarni úr sementsfestun í Borgarfirði

Kornakúrfa efnisins sem verið var að sementsbinda sýnir greinilega skort á fínefni og því mátti búast við því að sementið myndi ekki bindast fylliefninu eins og til er ætlast. Þrátt fyrir að efnið hafa ekki verið innan viðmiðunarmarka kornakúrfa sementsbundis efnis (Mynd 18) þá eykst samt sem áður styrkur vegarins við bindinguna sbr. myndir úr úrvinnslu falllóðsmælinga, en kannski ekki eins mikið og vonast var eftir.

4.1.2 Falllóðsmælingar

Helstu niðurstöður falllóðsmælinganna voru:

- Yfirborðsstífnin jókst úr 440 í 588 MPa við festun burðarlagsins eða um fjórðung. Það virðist vera nokkuð algengt að yfirborðsstífnin liggi á milli 500-600 MPa eftir sementsfestun.

- Burðargildi, *B*, var í kringum 19 áður en vegurinn var endurbættur, og hækkaði upp í 27 eftir sementsfestun burðarlagsins.
- K-gildið var í kringum 4,4 fyrir endurbætur og hækkaði upp í 7,7 strax eftir festun en lækkaði svo niður í 5,7 sumarið eftir festun. K-gildið er reiknað út frá niðurbeygju efstu 20 cm vegbyggingarinnar og er hugsanlegt að frekari sprungumyndun hafi orðið í festuninni eftir fyrsta veturinn. Skv. Norðmönnum ætti veikleiki vegbyggingarinnar að liggja í styrktar/undirlaginu ef stuðullinn er hærri en 5.
- Krappi yfirborðsins, *SCI*, var í kringum 180 fyrir styrkingu en strax eftir styrkingu hafði niðurbeygjan í efstu 30 cm dottið niður í 100. Hins vegar jókst niðurbeygjan sumarið eftir styrkingu upp í 116. Þetta er tillölulega mikil niðurbeygja borið saman við aðrar vegbyggingar með sementsfestu burðarlagi. Aukningin á milli ára eftir festun gæti bent til eins og áður sagði aukinnar sprungumyndunar á milli ára.

Mæling var gerð á veginum á þáatíma í maí 2015. Þar má greinilega sjá minni stífni vegbyggingarinnar en stífnin er samt sem áður mjög góð miðað við síðsumarstífni. Hugsanlega hjálpar hin auka stífni sementsfestunar sem dreifir álaginu betur niður á undirlagið og lágmarkar þannig skaða sem vegbyggingin verður fyrir á þáatíma.

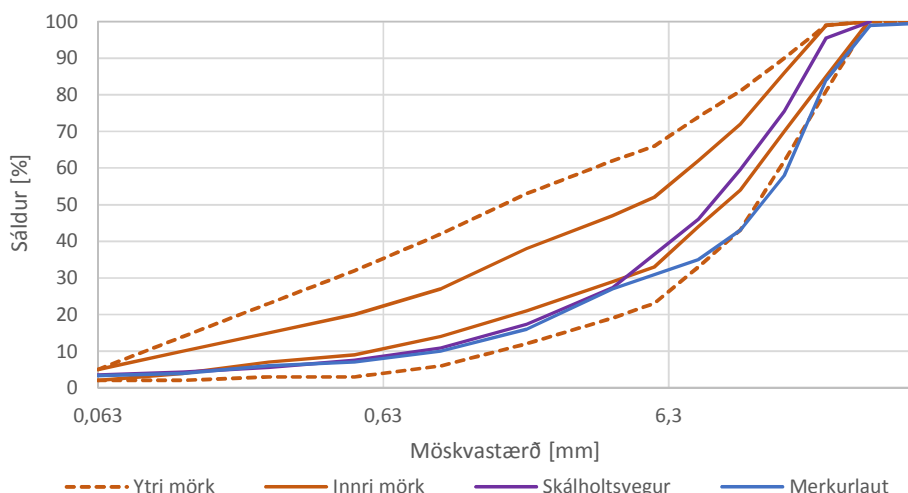
4.2 Óbundinn endurbæting Skálholtsvegur

Sumarið 2015 var keyrt í og jafnaðir rúmlega 2,5 km við Skálholt, Mynd 20. Vegurinn var þurrfræstur, keyrt í hann og ný klæðning lögð. Vegkaflinn var ekki styrktur en lagaður og efni bætt í veginn, þess vegna er forvitnilegt að bera saman falllóðsmælingar fyrir og eftir lagfæringu. Auk falllóðsmælinga var tekið sýni úr veginum við afleggjarann að lðu og því unnt að gera kornakúrfu, mæla brothlutfall og kleyfnistuðul. Efnið sem keyrt var í veginn var fengið úr námu við Merkurlaut, og fylgja með efnisprófanir sem áður höfðu verið gerðar úr námunni.

Á Mynd 21 er búið að setja kornakúrfurnar úr Skálholtsveginum og námunni við Merkurlaut inná viðmiðunarkúrfuna. Eins og sjá má falla kúrfurnar innan ytri marklínanna utan örlítis frávíks í efninu úr Merkurlautinni.



Mynd 20: Skálholtsvegur eftir að núverandi vegur var þurrfræstur.



Mynd 21: Viðmiðunarkornakúrfur Vegagerðarinnar ásamt kornakúrfum Skálholtsvegur og Merkurlautar.

Kleyfnistuðull efnisins úr Skálholtsvegi var 9,9% og úr Merkurlaut 3%, en hámarks-kleyfnistuðullinn er 20% á vegum með árdagsumferð þungra ökutækja meiri en 400 samkvæmt leiðbeiningarriti Vegagerðarinnar. Efnis standast því vel kröfur um kleyfnistuðul.

Brothlutfall efnisins var einnig mælt (Tafla 8) og fékkst $C_{75/4}$, fyrir efnið í veginum en $C_{100/0}$ fyrir efnið úr námunni. Samkvæmt leiðbeiningarriti Vegagerðarinnar á hlutfall efnisins sem er brotið að vera hærra en 90% fyrir malað harpað grjót og minna en 3% alnúið. Þetta gildir fyrir árdagsumferð þungra bíla hærri en 400 og 100. Staðbundið þurrfræst efni úr Skálholtsvegi er rétt undir mörkum þess efnis sem skal vera brotið og alnúið en efnið úr Merkurlaut stenst kröfur.

Los Angeles próf var gert fyrir námuefnið sem gaf LA-gildi uppá 27%. sem er yfir mörkum leiðbeiningarrits Vegagerðarinnar, þar sem efni skal vera minna en 25% fyrir 3.flokks efni sem er ferskt, fínblöðrótt basalt samkvæmt berggreiningu. LA-gildi var ekki reiknað fyrir staðbundið efni úr Skálholtsveginum.

Tafla 8: Brothlutfall efnisins úr Skálholtsvegi og Merkurlaut

	KORNASTÆRÐARBIL [mm]	HLUTFALL HEILDARSÝNIS [%]	C_c – HLUTI BROTINS EFNIS [%]	C_{TR} – HLUTI ALRÚNNADS EFNIS [%]
SKÁLHOLTSVEGUR	4-8	18,7	82	1
	8-16	29,5	80	2
	16-32	24,5	63	8
	Brotstig, vegið meðaltal	-	75	4
MERKURLAUT	Brotstig, vegið meðaltal	-	100	0

4.3 Bikbundið burðarlag í Biskupstungnabraut

Á Biskupstungnabraut voru tekin 6 borkjarnar úr veginum (Mynd 22) og á fjórum kjarnanna var mögulegt að mæla kleyfniþol þeirra, Tafla 9. Tveir kaflar á Biskupstungnabraut við afleggjarann að þjóðveginu voru bikbundir sumarið 2006. Eftir þurrfræsun var burðarlag vegarins bundið með bikþeytu. Þegar kjarnar voru skoðaðir, virðist sem efni burðarlagsins hafi verið gott með góða kornadreifingu en Þórustaðanáma er í námunda við veginn.



Mynd 22: Við kjarnatöku á Biskupstungnabraut

Tafla 9: Lýsing á bikfestunarkjörnum úr Biskupstungnabraut.

	STÖÐ*	LÝSING Á KJARNA
Kjarni 1	100 hk	Heildarhæð kjarna var 140 mm þar af voru ca. 100 mm heillegir
Kjarni 2	900 hk	Heildarhæð kjarna var 130 mm þar af voru ca. 65 mm heillegir
Kjarni 3	3450 hk	Heildarhæð kjarna var 140 mm þar af voru ca. 120 mm heillegir
Kjarni 4	4100 hk	Sýnið er að mestu mól, heilt klæðingarlag ca. 2 cm
Kjarni 5	3270 vk	Heildarhæð kjarna var 140 mm þar af voru ca. 70 mm heillegir, hins vegar var stór steinn neðantil í kjarnanum og sprunga í heillega hlutanum
Kjarni 6	600 vk	Sýnið er að mestu mól, heilt klæðingarlag ca. 2 cm

* hk – hægri kantur; vk – vinstri kantur

Kjarnarnir voru prófaðir við 25°C með hliðsjón af kafla 14.45 í Alverk 95, Mynd 23. Kleyfnibrotþolið reyndist vera um 274 kPa efst á kjarnanum en styrkurinn minnkaði niður í um 175 kPa neðar á kjarnanum, Tafla 10. Einungis var unnt að mæla styrkinn neðst á einum kjarnanum, en efst voru 3 kjarnar góðir en einn kjarninn var sprunginn og niðurstöður mælinga eftir því. Þessir kjarnar standast því leiðbeinandi gildi Vegagerðarinnar þar sem kleyfnibrotþol bikbundinna efna skal vera meira en 100 kPa við 25°C.



Mynd 23: Prófun kjarna á NMÍ úr Biskupstungnabraut.

Tafla 10: Niðurstöður prófanna á kleyfnibrotþoli bikbundnu kjarnanna úr Biskupstungnabraut.

SÝNI NR.	d (cm)	h _{av} (cm)	P (kN)	p (kPa)	ATHUGASEMDIR
1-1	7,8	6,8	2,29	275	Sýni úr efri hluta kjarnans
2-1	7,8	6,7	2,24	272	Sýni úr efri hluta kjarnans
3-1	7,8	6,7	2,27	276	Sýni úr efri hluta kjarnans
3-2	7,8	6,9	1,47	175	Sýni úr neðri hluta kjarnans
5-1	7,8	6,4	1,17	150	Sýni úr efri hluta kjarnans Sýni losaralegt þar sem sprunga var í sýninu

Falllóðsmælingar á þessum vegkafla gáfu betri niðurstöður eftir styrkingu heldur en aðrir bikfestir kaflar sem voru skoðaðir.

4.4 Sementsfestun á Barðastrandavegi haustið 2016

Sumarið 2016 var boðin út þurrfræsing, festun með sementi, jöfnun á hæðarlegu og þverhalla og lögn tvöfaldrar klæðingar á Barðastrandavegi (62-05) um 4 km langa leið, eða frá stöð 6.776 til stöðvar 10.520 og frá stöð 11.895 til stöðvar 12.200, Mynd 24. Verkinu átti að ljúka fyrir 1.september 2016 en einhverjar tafir urðu á því að verkið kláraðist. Vegna þessa náðist ekki að taka kjarna úr festuninni né heldur að falllóðsmæla haustið 2016. Í lok júní 2017 hefur verktaki ekki enn skilað kjörnum og því miður er verið að endurnýja bíl og bor í Borgarnesi þ.a. sýnataka verður að bíða fram til lok sumars. Verktaka láðist að láta rannsakendur vita um fyrirætlanir sýnar þ.a. ekki náðist að taka sýni úr veginum til að fá kornakúrfu og aðra efniseiginleika efnisins.



Mynd 24: Sementsfestun við Patreksfjörð sumarið/haustið 2016

Þar sem bæta þurfti við efni var notað afréttingarefni 0/25 mm í námunni Ofan Kleifabúa (20380). Breidd festunnar var 5,8 m og þykktin 150 mm. Viðbótar burðarlagsefni var áætlað um 200 m³ fyrir fyrri 3744 metra langa kaflann og 100 m³ fyrir seinni 305 metrana. Áætlað magn sements um 433 tonn. Breidd klæðingar var 6,0 m.

Um hefðbundna framkvæmd var að ræða þar sem semetsmagnið er 21 kg/m² fyrir 170 mm þykkt festunar og 24 kg/m² fyrir 200 mm þykkt. Gert ráð fyrir að lágmarks brotþol sýna sé 7 MPa eftir 28 daga. Viðbótar steinefni uppfyllir kröfur til efra burðarlagsefnis til sementsfestunar. Rakastig burðarlagsins skal vera 1-2% undir hagstæðasta rakastigi sem gert er ráð fyrir að sé 6-8%.

Hafa verður í huga að kaflinn var styrktur í september sem verður að teljast frekar seint og falllóðsmælingar eftir styrkingu gerðar á sumarsólstöðum 21.júní 2017 þ.a. mögulega hefur sementið í veginum ekki hvarfast sem skildi yfir vetramánuðina. Niðurstöður falllóðsmælinga sýna eftirfarandi:

- Yfirborðsstífnin hafði haldist stöðug í kringum 360 MPa frá árinu 2002 til 2016. Við sementsstyrkinguna jókst styrkurinn um 20% og mældist 460 MPa í júní 2017.
- Burðarstuðullinn, *B*, jókst um 36% fór úr 16-17 upp í 25 en eins og með yfirborðsstífnina hafði burðarstuðullinn haldist stöðugur á milli ára. Eins og áður er stuðullinn háður árdagsumferð þungra bíla og þess vegna frekar hár á veginum þar sem þungaumferð um Barðastrandaveg er ekki mikill borin saman við margar aðra vegi á Íslandi og í Noregi þaðan sem stuðullinn kemur.
- K - gildi fyrir styrkingu hafði haldist stöðugt í kringum 3,2-3,4 fyrir festun burðarlagsins en við festunina jókst K-gildið upp í 6,6. Það gefur til kynna að veikleiki vegbyggingarinnar hafi flust úr burðar/styrktarlaginu og niður í styrktar- eða undirlagið. Í Noregi er talið að ef K-gildið er hærra en 5 þá liggi veikleikinn í styrktar eða undirlagi vegbyggingarinnar.
- Krappi yfirborðsins, *SCI*, var í kringum 270 fyrir styrkingu en eftir styrkingu hafði niðurbeygjan í efstu 30 cm dottið niður í 148. Niðurbeygjan efst í vegbyggingunni hafði því minnkað verulega eða um 80%. Þetta er samt sem áður meiri niðurbeygja heldur en aðrar sementsstyrktar vegbyggingar sem hafa verið skoðaðar í þessu verkefni, sem hafa allar verið minni en 125 og flestar undir 100.

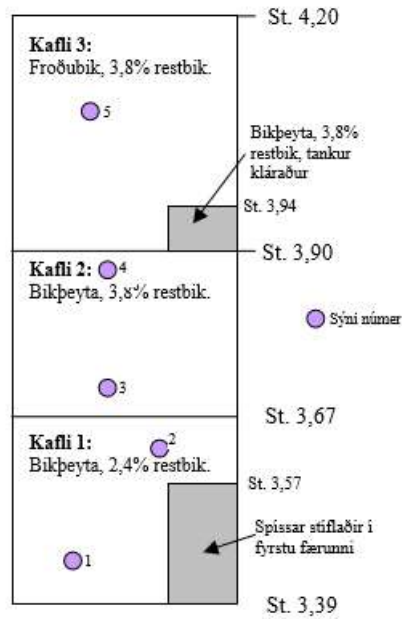
Minni breyting var á öðrum gildum en niðurstöður falllóðsmælinganna má sjá í samantekt og viðauka A hér að neðan.

4.5 Prófun á bikfestun – Ólafsfjarðarvegur

Hautið 2001 voru 3 kaflar bikbundnir á Ólafsfjarðarvegi við Fagraskóg (vegnúmer: 82-02). Þetta var tilraunaverkefni þar sem forðubik og bikþeyta voru notuð til festunnar. Skrifuð var áfangaskýrsla um verkefnið sem nefnist „Bikþeyta til festunar – Áfangaskýrsla I“ (Þórir Ingason, 2004). Á Mynd 25 má sjá kaflana þrjá sem voru prófaðir, tveir kaflar voru bundir með bikþeytu annars vegar 2,4% biki og hins vegar 3,8% biki, þriðji kaflinn var hins vegar bundinn með 3,8% froðubiki. Sýni voru tekin á tveimur stöðum í punkti 1 og 2 á Mynd 25. Kornadreifing sýnanna sýndi að sýnin voru fínafna- og sandrík (sigti 0,075 , 15,4 og 12,2%) og vel utan marklína efra burðarlagsefnis skv. ALVERKI 95. Efnið er ennig of fínafnaríkt fyrir burðarlagsefni blandað með bikþeytu í stöð og í efri mörkum fyrir burðarlagsefni blandað froðubiki í blöndunarstöð. Lýsingu á framkvæmdinni má finna í áður nefndri skýrslu.

Fimm sýni voru tekin úr festuninni (Mynd 25) og kleyfnibrotþol, bindiefnisinnihald og kornastærðardreifing mæld (Tafla 11 og Mynd 26). Þegar lesið er í niðurstöðurnar má sjá að helst til lítið bik er í kafla 2 og helst til mikið í kafla 3. Kleyfnibrotþolið er of lágt í kafla 1 þar sem gert er krafa um 100 kPa kleyfnibrotþol skv. ALVERK 95. Þegar litið er til burðarpols vegkaflanna virðist ekki vera samræmi á milli niðurstaðna kleyfnibrotþolsins sýnanna og burðarpols veganna, eins og sjá má í umfjöllun um falllóðsmælingar hér að neðan.

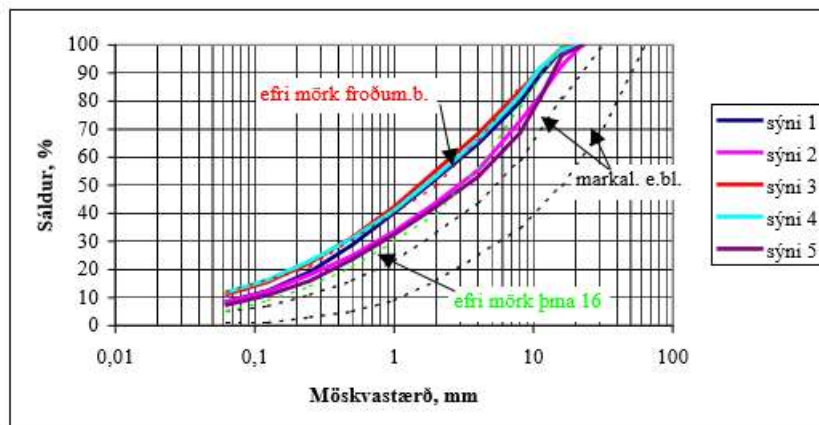
Til stendur að taka nýja kjarna úr efninu um leið og tækjabúnaður leyfir til þess að meta kleyfnibrotþol hinna mismunandi festingaraðferða 16 árum eftir að festun var framkvæmd.



Mynd 25: Tilranakafar, staðsetning, gerð og frávik, númer sýna af bikblöndu (Þórir Ingason, 2004).

Tafla 11: Niðurstöður mælinga á sýnum teknum af bikblöndun eftir fræsun (Þórir Ingason, 2004).

	KLEFNIBROTÞOL [kPa]		BIKINNIHALD	HÖNNUNARMAGN BIKS	VATNSINNIHALD
	MEÐALTAL	STAÐALFRÁVIK			
Sýni 1	70,7	2,6	2,66%	Bikþeyta 2,4%	5,26%
Sýni 2	82,2	5,2	2,38%	Bikþeyta 2,4%	4,83%
Sýni 3	134,5	3,7	3,41%	Bikþeyta 3,8%	6,12%
Sýni 4	120,7	7,7	3,45%	Bikþeyta 3,8%	6,10%
Sýni 5	148,6	29,0	4,07%	Froðubik 3,8%	5,17%



Mynd 26: Kornastærðardreifing sýna eftir fræsun og blöndun með biki sem og markalínur fyrir efra burðarlag og efri markalínur fyrir froðumalbik og þeytumalbik (þma), skv. ALVERK 95 (Þórir Ingason, 2004).

4.5.1 Falllóðsmælingar

Falllóðsmælingar hafa verið teknar með nokkuð reglulegu millibili af vegspottunum sem voru bikbundir haustið 2001. Á Mynd 27 eru sýndar meðaltalsmælingar af yfirborðsstífninni (E_{surf}), krappa yfirborðsins (SCI), skemmdarstuðull burðarlags (BDI) og flatarmál sigdældar eða niðurbeygju ($AUPP$). Frekari útlistanir á reikningum falllóðsmælinga má finna í kaflanum um falllóðsmælingar.

Til eru sjö mælingarseríur af veginum, tvær áður en burðarlag vegarins var bikbundið árin 1996 og 1998 og fimm eftir að burðarlag vegarins var bikbundið, árin 2001, 2002, 2003, 2005, 2009 og 2014. Mælingin 2002 var framkvæmd í lok apríl sem verður að teljast heldur snemmt en líklegt er að vegurinn hafi ekki jafnað sig eftir þýðu, þ.e.a.s. mælingin hafi verið framkvæmd á þáátíma. Hvað viðhald á veginum varðar var fyrsta klæðingarlagið sett á haustið 2001 og seinna lagið sumarið 2002. Eftir það hefur klæðing vegarins tvisvar sinnum verið endurnýjuð með tvöfaldri klæðingu sumrin 2008 og 2013.

Yfirborðsstífnin, E_{surf} – við fyrstu skoðun virðist sem froðubikið skili meiri yfirborðsstífni heldur en bikþeytan og að stífnin hin aukna stífni haldist eða aukast í þau 15 ár sem liðin eru frá því að kaflinn var festur. Hins vegar verður að hafa í huga að yfirborðsstífni vegarins var einnig mest á kafla 3, sem festur var með froðubiki, áður en festunin átti sér stað. Þannig má spyrja sig hvort að hærri stífni fyrir styrkingu leiði til hærri stífni eftir styrkingu. Eðlilegt verður að teljast að falllóðsmælingar sem teknar voru strax eftir að festun var framkvæmd sýni ekki aukna stífni. Bikfestun þarf allt að nokkrum árum að ná fullti stífni og sýnir þess vegna oft litla styrktaraukningu fyrst eftir útlögn. Endurnýjun klæðingar og / eða aldur festunnar getur skýrt aukna yfirborðsstífni sumarið 2009 m.v. sumarið 2005. Ef mælingar árána 2003 og 2005 eru hins vegar bornar saman þá sést að yfirborðsstífnin stendur nánast í stað á milli þessarar tveggja ára, og er heldur að aukast ef eitthvað er.

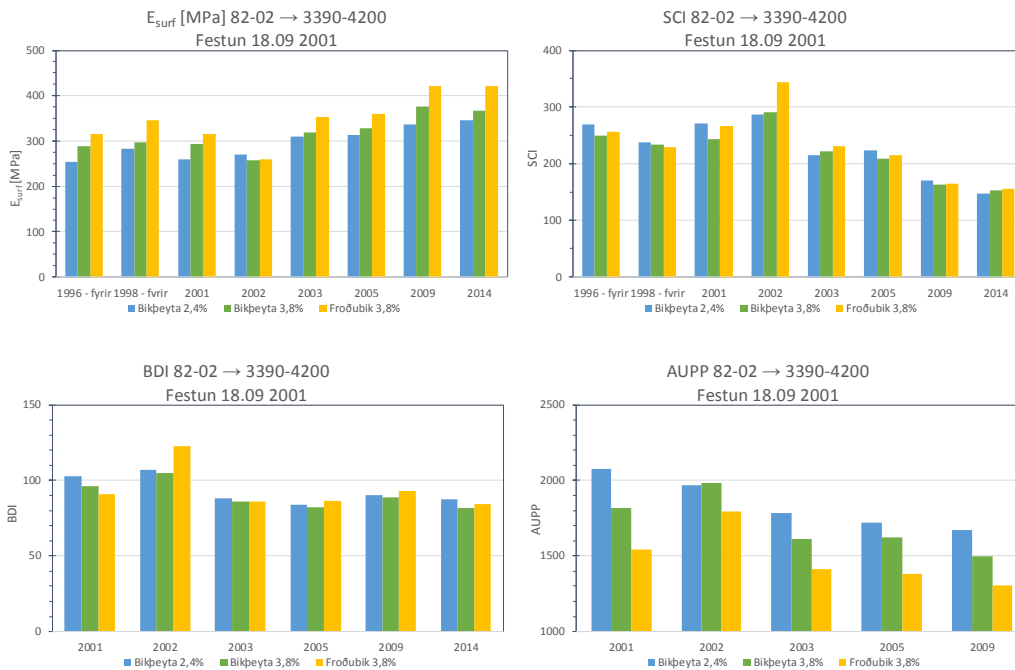
Krappi yfirborðsins, SCI – mælir niðurbeygju vegbyggingarinnar á efstu 30 cm en niðurbeygjan er minni eftir að burðarlagið var styrkt utan ársins 2001 áður en bikið hefur jafnað sig og 2002 þegar mælingar voru teknar snemma vors. Sumarið 2003 er niðurbeygjan minni heldur en hún var áður en ráðist var í endurbætur og virðist hún haldast stöðugt og minnkar svo enn frekar þegar ný klæðing er lögð á veginn. Niðurbeygjan er mjög áþekkt hvort heldur notað er froðubik eða bikþeyta með 2,4 eða 3,8% biki. Niðurbeygjan var einnig svipuð fyrir alla veghlutana 3 áður en vegurinn var endurbættur.

Skemmdarstuðull burðarlags (BDI) – gefur til kynna stífni eða niðurbeygjur styrktarlags vegbyggingarinnar, eða á milli 30 og 60 cm frá yfirborði hennar. Ekki var hægt að reikna stuðulinn með þeim mælingum sem teknar voru áður en burðarlagið var bikbundið, en ekki er sjáanlegur munur á niðurbeygju styrktarlagsins hvort heldur sem notað er froðubik eða bikþeyta með 2,4 eða 3,8% biki.

Flatarmál sigdældar eða niðurbeygju ($AUPP$) – því miður var ekki hægt að reikna AUPP fyrir vegbygginguna áður en burðarlagið var styrkt sem og fyrir mælingarnar sem teknar voru sumarið 2014. Svo virðist sem að froðubikið hefur minna flatarmál heldur en bikþeytan og að meiri bikþeyta sýnir meiri stífni heldur en minni bikþeyta. Flatarmálið minnkar milli árána 2001 og 2003 sem gefur til kynna að bikið hafi tekið sig og styrkingin heppnast. Flatarmálið helst nokkuð stöðugt eða fer heldur minnkandi milli árána 2003 og 2009 sem gefur til kynna að vegbyggingin haldi stífninni.

Mælingar vorið 2002 sýna meiri niðurbeygju í froðubikskafnanum heldur en í köflunum tveimur sem festir voru með bikþeytu. Talið er að froðubikið taki sig fyrr borið saman við bikþeytuna og virðist það

sýnilegt fyrir BDI niðurbeygjuna og mögulega AUPP en það er ekki sýnilegt þegar SCI niðurbeygjan er skoðuð.



Mynd 27: Niðurstöður falllóðsmælinga árána 1996 og 1998 áður en burðarlagið var bikbundið á árána 2001, 2002, 2003, 2005, 2009 og 2014 eftir bindingu burðarlagsins.

4.6 Sementsfestun á Norðurlandi, vegir 1-k6, 1-k7 og 1-p3/4

Það sem fram kemur í þessum kafla er úr skýrslu Guðmundar I. Waage (2011) um sementsfestun og breikkun á hringvegi 2010. Samarið 2010 var ákveðið að bjóða út verk með vali um notkun biks eða sements til styrkingar vegna þess hve hátt verð var á biki. Um var að ræða 3 kafla, tvo í Víðidal (1-k6, 1-k7) og einn í Hörgárdal (1-p3 og 1-p4).

Bundið slitlag var lagt á vegina 1984-1985, vegkaflarnir voru farnir að láta verulega á sjá:

- 1-k6 – mjög illa farinn, bæði sprunginn og ósléttur. B gildi falllóðsmælinga var 11,8-16,4 tonn.
- 1-k7 – nokkuð sprunginn og mjög ósléttur að hluta. B gildi falllóðsmælinga var 11,7 tonn.
- 1-p3/4 – nokkuð sprunginn og ósléttur. B gildi falllóðsmælinga var 15,5 tonn.

Falllóðsmælingar voru ekki taldar endurspegla veikleika vegbygginganna þar sem veikleikinn var talinn vera vatnsdrægni efra burðarlagsins, sem bar ekki umferðina í vetraþýðum. Afvötnun veganna var ekki góð, malaraxlir og skemmdir á köntum sem héldu vatni á veginum.

Eftir forrannsóknir var ákveðið að nota 5-5,5% sement í vegspotta 1-k6 og 1-k7 við 7,5-8% raka í efninu. Sementsfestunin var 15 cm þykk og sementsmagnið 16,7 kg/m² m.v. 5% sementsmagn í Víðidal (1-k6 sementsmagn 3% fram yfir fræðilegt magn). Í kafla 1-k7 stöð 600-760 var notað 3% sement, ekki sést merkjanlegur munur á milli þessa kafla og annarra í 1-k7 fljótlega eftir útlögn að öðru leyti en því að ekki náðust upp heilir kjarnar úr vegspottanum. Í Hörgárdal var hins vegar notað 5,5% sement sem fræðilega gefur 18,4kg/m² en heldur meira sement fór í veginn eða 19,5 kg/m². Megin ástæða aukins

sementsmagns í Hörgárdal, var til að draga úr holumyndun á yfirborði. Í rigningu sem gerði á fest burðarlag holaði umferð burðarlagið verulega, jafnvel nokkra daga eftir útlögn.

Fláar voru malarefni, en frekar fíngert og sandrikt í 1-k7, á meðan efra burðarlagsefnið reyndist vera klessulegt og fínefnaríkt. Mun minna fínefni var í burðarlagsefninu í Hörgárdal heldur en í Víðidal.

Nokkur vandræði voru með sementsdreifarann sem notaður var í verkinu (Bomag 12000) og því á stundum ójöfn dreifing sements. Brotvöltun var framkvæmd seinna en 24-30 klst eftir framkvæmd eins og tilgreint var í útboðsgögnum.

Steyptir voru 7 sívalningar úr efninu og reyndust þeir hafa 7 daga styrk upp á 4,91 – 8,95 MPa. Ekki tókst að ná upp heillegum kjörnum fljótlega eftir útlögn en hálfu ári seinna voru teknir 30 kjarnar og hægt að brjóta 20 af þeim. Brotþolið var frá 4 MPa upp í 25 MPa, kjarninn með lægsta styrkinn var einnig léttastur sem bendir til lélegrar þjöppunnar og stórir steinar virtust hafa áhrif á styrkinn.

- 1-k6, 6 kjarnar brotnir með brotþol 5, 5, 8, 7, 9 og 4 MPa eða 6,3 MPa að meðaltali
- 1-k7, 4 kjarnar brotnir með brotþol 4, 6, 5 og 13 MPa eða 7 MPa að meðaltali
- 1-p3 / 4, 10 kjarnar brotnir með brotþol 25, 9, 8, 18, 7, 11, 19, 13, 8, 14 MPa eða 13,2 MPa að meðaltali

Falllódsmælingar eru til af þessum vegspottum áður en ráðist var í festun sem og eftir. Í öllum tilfellum eykst yfirborðsstífnin við festunina og eykst hún mest í 1-p3 þar sem sementsmagnið var heldur meira borið saman við 1-k6 og 1-k7, Mynd 28. Hins vegar vekur athygli að þar sem yfirborðsstífnin var mest í byrjun þar eykst hún líka mest við styrkingu. Þegar SCI stuðullinn sem mælir niðurbeygju vegbyggingarinnar á efstu 30 cm er skoðaður, kemur hins vegar í ljós að lítill munur virðist vera minni niðurbeygju eftir styrkingu hvort heldur sem notað er 5 eða 5,5% sement. Vonir standa til að geta falllódsmælt þessa vegakafla aftur sumarið 2017 og sjá hvernig þeim reiðir af 7 árum eftir styrkingu.



Mynd 28: Niðurstöður falllódsmælinga ársins 2006 áður en burðarlagið var sementsbundið og árána 2011 og 2013 eftir bindingu burðarlagsins.

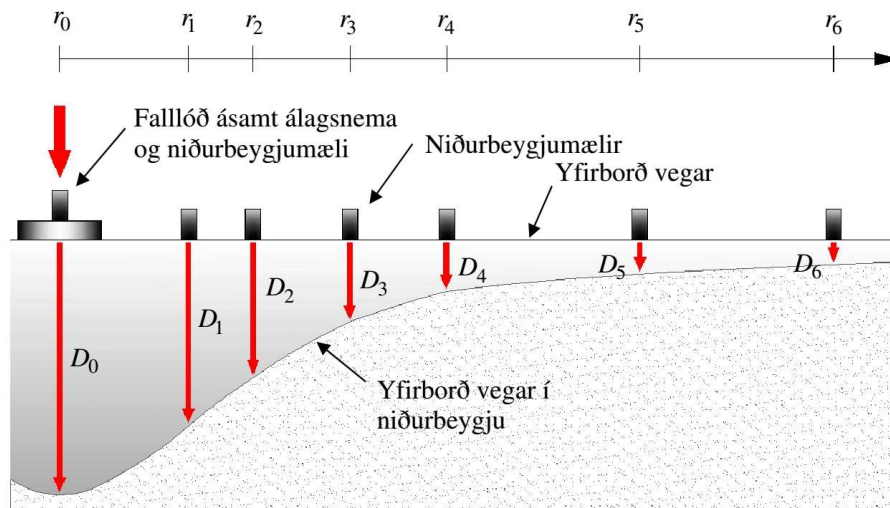
5 FALLLÓÐSMÆLINGAR

Vegagerðin hefur átt falllóð í all nokkur ár eða áratugi núna sem hægt er að notast við þegar meta skal burðarþol og styrk vega, Mynd 29. Þessar mælingar eru verðmætar og gefa okkur tækifæri til þess að fylgjast með styrk vega fyrir og eftir að burðarlög hafa verið endurnýjuð og/eða styrkt.

Falllóðsmælingar (Mynd 30) eru oft gerðar á vegbyggingum til þess að meta burðarþolsgildi vegbygginga. Margar mismunandi leiðir eru til þegar kemur að úrvinnslu gagna sem fást og er velþekkt að bakreikna stífni mismunandi laga vegbygginga með aðstoð ítrunarforrita en til þess að það beri árangur þarf að liggja fyrir lagþykktir vegarins. Hægt er að meta lagþykktir út frá falllóðsmælingum en það krefst frekari ítranna. Í þessum hluta verkefnisins var farin sú leið að nota niðurbeygjumælingarnar beint til að meta ástand vegbygginganna fyrir og eftir styrkingar en í framhaldinu er hugmyndin að bakreikna vegbyggingarnar með meiri nákvæmni.



Mynd 29: Falllóðstæki Vegagerðarinnar (Helga Þórunn Gunnlaugsdóttir, 2008).



Mynd 30: Einfölduð uppsetning falllóðs og nema, D_0 er niðurbeygjan undir álagsmiðjunni og D_i er mæld niðurbeygja í fjarlægð r_i frá miðju álagsins (Helga Þórunn Gunnlaugsdóttir, 2008).

Margar mismunandi stærðir er hægt að reikna út úr niðurbeygjumælingum nema í mismunandi fjarlægð frá falllóðinu:

$E_{surf} = \left(2 \cdot P / \pi \cdot d_0 \cdot a\right) \cdot (1 - \nu^2)$	Yfirborðsstífni
$E_{FWD} = 284,9 \cdot \left(P / d_{90}\right)^{0,894}$	Stífnistuðull vegbyggingar notaður í Flórída (reynslujafna)
$E_U = \frac{52000}{d_{90}^{1,5}}$	Stífnistuðull vegbyggingar notaður í Svíþjóð (reynslujafna)
$B = 11 \cdot \left(E_{dim} / 200\right)^{0,6} \cdot \left(50 / \dot{A}DT_T\right)^{0,072}$	Burðarstuðull notaður í Noregi ÁDT _T er árdagsumferð þungaumferðar
$E_{dim} = \frac{110 \cdot p}{\sqrt{d_0 \cdot (d_0 - d_{20})}}$	
$K = \frac{d_0}{d_0 - d_{20}}$	Gefur til kynna hvar helsti veikleiki vegbyggingarinnar er, því hærra gildi því neðar er veikleikinn
$SCI = d_0 - d_{30}$	Krappi yfirborðsins, gefur til kynna stífni efstu laga vegbyggingar
$BCI = d_{60} - d_{90}$	Krappi burðarlags, gefur til kynna stífni neðstu laga vegbyggingar eða efsta lag undirlags
$BDI = d_{30} - d_{60}$	Skemmdarstuðull burðarlags, gefur til kynna stífni miðbiks vegbyggingar
$AUPP = 0,5 \cdot (5d_0 + 2d_{30} + 2d_{60} + d_{90})$	Flatarmál sigdældar eða niðurbeygjunnar sem vegbyggingin verður fyrir

E_{FWD} og E_U eru áætlaðir stífnistuðlar út frá reynslujöfnum frá Bandaríkjunum og Svíþjóð og eru ekki sannreynðir miðað við íslenskar aðstæður. Breytingin er ekki mikil á milli stuðlanna þar sem að þeir byggja á niðurbeygju mælda 90 cm frá álagsmiðju, og gefa því til kynna niðurbeygju sem verður nokkuð djúpt í vegbyggingunni. Vegna þessa verða þessir stuðlar ekki notaðir í þessu verkefni.

B-stuðulinn eða burðarstuðulinn er Norsk reynslujafna notaður til að meta burðargetu vega. Árdagssumferð þungaumferðar kemur inni þann stuðulinn en stuðulinn lækkar þegar þungaumferð eykst. Því er spurning hversu mikið eigi að horfa í þennan stuðul þar sem erfitt er að uppfæra reynslujöfnur yfir á nýja staðhætti, með öðruvísi umferð og umhverfisskilyrði á Íslandi samanborið við Noreg.

Í Noregi, þar sem K stuðulinn er notaður, er talað um að þar sem K er stærra en 5 liggur helsti veikleikinn í styrktar- eða undirlaginu. Ef K er hins vegar á milli 3 og 5 liggur veikleikinn í burðar eða styrktarlagi og að lokum þar sem K er minna en 3 er líklegt að helsti veikleiki vegbyggingarinnar sé í burðar eða slitlaginu.

5.1 Sementsfestir vegir (sementsbundið burðarlag)

Þó nokkrir vegir á Íslandi hafa verið endurbættir með sementsfestu burðarlagi undanfarin ár. Í mörgum tilfellum eru til falllódsmælingar fyrir og eftir styrkingu og því hægt að meta áhrif styrkingarinnar. Þegar þær allnokkru myndir sem eru í kafla 6 og viðauka A eru skoðaðar kemur berlega í ljós að efri hluti vegbyggingarinnar styrkist umtalsvert við þá aðgerð að sementsfesta þ.e.a.s. minni niðurbeygjur mælast eftir að búið er að sementsstyrkja. Það sem meira er að þessi aukna stífni virðist haldast vel með tímanum. Stífnin eða stærð mældrar niðurbeygju helst nánast óbreytt í neðri helmingi vegbyggingarinnar. Vegkaflarnir sem voru skoðaðir vegna sementsstyrkts burðarlags eru listaðir í töfluTafla 12, allir kaflarnir eru með tvöfaldri klæðingu yfir sementsstyrkta burðarlaginu. Í töflunni eru tilteknir brotþol kjarna, en niðurstöður utan Borgarfjarðar eru fengnar úr skýrslu eftir þá Ingva Árnason, Guðmund Inga Waage og Sigurstein Hjartarson rituð árið 2012. Í skýrslunni eru einnig tiltekin nokkur önnur gildi en ekki listað hvar kjarnarnir eru teknir á hringveginum, þessi gildi hafa meðaltalsstyrk upp á 9,95 MPa, miðgildi 8 MPa, hæðsta gildi 25 MPa og lægsta gildi 4 MPa. Um þriðjungur kjarna komu upp óskemmdir þ.a. hægt var að mæla brotstyrkinn.

Tafla 12: Niðurstöður nýjustu mælinga og síðustu mælinga fyrir styrkingu, ásamt reiknuðum prósentumun mælinganna

VEGUR	BROTÞOL [MPa]	Ár	E _{surf} [MPa]	B [tonn]	K	SCI	BCI	BDI	AUPP
1-k6; st. 950-4066 Styrkt 25.09.2010 Þykkt 15 cm		2006	370	16,4	4,8	194	55	122	2054
		2015	583	35,3	15,1	60	56	72	1509
		[%]	37%	54%	68%	-223%	2%	-69%	-36%
1-k7; st. 210-2.542 Styrkt 25.09.2010 Þykkt 15 cm		2006	312	14,4	4,3	248	71	163	2245
		2013	528	32,9	12,7	110	63	115	1705
		[%]	41%	56%	66%	-125%	-13%	-42%	-32%
1-k8; st. 10.365-11.389 Styrkt 27.08.2011 Þykkt 15 cm	7; 9	2004	458	18,2	3,4	192	47	116	1544
		2015	845	48,6	14,2	57	40	59	995
		[%]	46%	63%	76%	-237%	-18%	-97%	-55%
1-m2; st. 7.860-13.240 Styrkt 31.08.1996 Þykkt 10 cm	4,1-15,6	1996	304	12,8	3,3	301	-	-	-
		2015	544	27,8	13,2	88	-	-	-
		[%]	44%	54%	75%	-242%	-	-	-
1-h0; st. 0-2.940 Styrkt 01.08.2015 Þykkt 15-20 cm	5,1; 7,2; 4,7	2015	436	19	4,4	171	50	107	1637
		2016	588	26,8	5,7	116	42	88	1329
		[%]	26%	29%	23%	-47%	-19%	-22%	-23%
1-p3; st. 1.415-4.060		2008	436	17	3,5	212	-	112	-

Styrkt 25.09.2010 Þykkt 15 cm		2014	994	50	9,9	53	-	62	-
		[%]	56%	66%	65%	-300%	-	-81%	-
1-h1; st. 9.470-9.940 Styrkt 01.08.2011 Þykkt 15cm	8	2009	439	18	3,9	191	40	102	1529
		2015	564	28	7	100	53	95	1337
		[%]	22%	36%	44%	-91%	25%	-7%	-14%
1-h1; st. 7.000-8.350 Styrkt 27.08.2014 Þykkt 15 cm		2009	465	19	3,9	181	37	105	1456
		2015	604	29	6,5	100	46	88	1229
		[%]	23%	34%	40%	-81%	20%	-19%	-18%
1-p3; st. 7.997-10.010 Styrkt 27.08.2011 Þykkt 15 cm	16; 7; 11; 18; 11; 7	2011	484	20	4	176	-	95	-
		2014	762	43	16,1	51	-	67	-
		[%]	36%	53%	75%	-245%	-	-42%	-
75-02; st. 12.310-13.890 Styrkt 27.08.2011 Þykkt 15 cm	9; 12; 6; 7	2009	316	13	3,7	281	-	-	-
		2014	547	33	15,6	64	-	-	-
		[%]	42%	61%	76%	-339%	-	-	-
75-02; st. 9.813-12.310 Styrkt 08.08.2014 Þykkt 17 cm		2009	347	15	4,2	302	-	-	-
		2014	501	30	15,3	62	-	-	-
		[%]	31%	50%	73%	-387%	-	-	-
62-05; st. 6.776-10.520 Styrkt 09.2016 Þykkt 15-17 cm		2016	352	16	3,4	269	50	161	1818
		2017	460	25	6,6	148	65	147	1615
		[%]	23%	36%	48%	-82%	23%	-10%	-13%

Niðurstöður falllóðsmælinganna eru teknar lítillaga saman hér að neðan:

- Yfirborðsstífnin er að aukast um 22-56% við styrkinguna, og er minnst á vegum 1-h0 og 1-h1.
- B-stuðulinn eykst um 29-66%.
- K stuðulinn eykst um 23-76%, en því hærra sem K-gildið er því neðar liggur veikleiki vegbyggingarinnar. K stuðulinn sem fæst eftir styrkingu gefur til kynna að veikleikinn liggir í vegbotninum eða neðst í vegbyggingunni. K gildið er lang lægst í vegkaflanum inn í Borgarfirði (1-h0) sem var styrktur sumarið 2015 og fast á hæla honum er 1-h1 kaflarnir. En aðrir kaflar eru um eða langt yfir 10 í K-gildi.
- SCI sem gefur til kynna stífni efstu 30 cm vegbyggingarinnar minskar um 47-387% sem gefur til kynna að niðurbeygjur í efsta hluta vegbyggingarinnar eru umtalsvert minni heldur en fyrir styrkingu. Aftur er munurinn minnstur í Borgarfirðinum (1-h0) og á 1-h1 en í öllum öðrum tilfellum minskar niðurbeygjan um allavega helming.
- BCI sem gefur til kynna stífni neðstu laga vegbyggingar breytist ekki mikið en lækkar þó aðeins í þremur tilvikum á meðan magn niðurbeygjunnar stendur í stað í fjórða tilfellinu og hækkar á tveimur stöðum í vegi 1-h1. Ekki var unnt að reikna BCI stuðul fyrir alla vegspottanna þar sem mælingar vantaði í réttri fjarlægð frá álagsmiðjunni.
- BDI sem er skemmdarstuðull burðarlags, eða mæld niðurbeygja á 30-60 cm dýpi frá yfirborði minnkar um 7-97% og má það vætanlega rekja til þess að sementsstyrkingin dreifir álaginu betur eða jafnar álagið betur en óbundið efni. Athygli vekur að vegir 1-h0 og 1-h1 sýna minnstu minnkun í BDI, en aðrir vegir sýna svipaða niðurbeygju eftir styrkingu.
- AUPP eða flatarmál sigdældarinnar minnkar um 14-55% eftir styrkinguna sem gefur til kynna stífari vegbyggingu þar sem minni niðurbeygjur eru mældar.

Það sem er athyglisvert hérna er að þrátt fyrir að sementsstyrkti vegkaflinn inni Borgarfirði (1-h0 og 1-h1) sé að sýna aukinn styrk er styrktaraukningin minni heldur en í sumum hinna veganna. Hugsanleg ástæða getur verið fínefnaleysi efnisins.

5.2 Bikbundnir vegir (bikfest burðarlag)

Nokkuð af vegum á Íslandi voru endurbættir með bikfestu burðarlagi á árunum fyrir 2009 en lítið hefur verið bikbundið síðastliðin 7 ár. Í mörgum tilfellum eru til falllódsmælingar fyrir og eftir styrkingu og því hægt að meta áhrif styrkingarinnar á burð veganna sem verið var að endurbæta. Í þeim tilvikum sem hér eru skoðuð þá eru festu burðarlögin bundin með froðubiki en einnig eru 4 vegbyggingar þar sem burðarlagið var bundið með bikpeytu. Listi yfir þá vegaspotta sem teknir hafa verið fyrir eru í Tafla 13 og myndir í kafla 6 og viðauka B. Í flestum tilfellum styrkist efsti hluti vegbyggingarinnar, þar sem bæði yfirborðsstífnin og niðurbeygjan í efstu 30 cm minnkar. Burður vegbygginganna virðist halda sér vel í þau 10 ár sem mælingarnar ná yfir. Styrking burðarlagsins hefur lítil áhrif á neðri hluta vegbyggingarinnar.

Tafla 13: Niðurstöður nýjustu mælinga og síðustu mælinga fyrir styrkingu, ásamt reiknuðum prósentumun mælinganna fyrir bikbundin burðarlög.

VEGUR	ÁR	E _{surf} [MPa]	B [tonn]	K	SCI	BCI	BDI	AUPP
1-c8; st. 2.121-7.013								
Styrkt 24.06.2000	2015	330	17,7	4,7	157	56	121	1719
Bikpeyta 10 cm	[%]							
35-01; st. 48-1.328	2005	241	11,5	3,9	329	55	146	3190
Styrkt 24.06.2006	2016	290	14,7	6,3	183	71	147	2762
Bikpeyta 10 cm	[%]	17%	22%	38%	-80%	23%	1%	-15%
35-01; st. 3.082-4.336	2005	367	15,8	3,1	274	35	108	1935
Styrkt 24.06.2006	2016	467	20,7	4,6	157	49	114	1673
Bikpeyta 10 cm	[%]	21%	24%	33%	-75%	29%	5%	-16%
1-c0; st. 300-3.700	2004	213	11,5	3,8	315	114	179	2593
Styrkt 28.06.2008	2015	257	14,4	4,7	206	79	165	2221
Bikpeyta 12 cm	[%]	17%	20%	19%	-53%	-44%	-8%	-8%
1-h3; st. 0-1.026	2005	390	20,4	3,7	166	36	92	1363
Styrkt 30.07.2005	2015	425	21,9	3,9	139	40	87	1263
Froðubik 15 cm	[%]	8%	7%	5%	-19%	10%	-6%	-8%
1-h4; st. 7.753-8.637	2003	364	18,4	3,1	212	42	99	1376
Styrkt 28.07.2007	2010	581	32,1	5,3	148	28	79	995
Froðubik 15 cm	[%]	37%	43%	42%	-43%	-50%	-25%	-38%
1-k7; st. 2.543-5.600	2004	266	15,8	4,3	228	67	128	2155
Styrkt 29.07.2006	2011	281	17	4,5	196	61	129	2165
Froðubik 10 cm	[%]	5%	7%	4%	-16%	-10%	1%	0%
1-k7; st. 5.600-11.190	2006	196	18,2	4,9	182	58	117	1952
Styrkt 28.07.2007	2011	313	19,8	5,8	161		108	
Froðubik 15 cm	[%]	37%	8%	16%	-13%		-8%	
1-k8; st. 205-4.687	2004	307	16,9	4,2	196	55	100	1891
Styrkt 28.07.2007	2015	389	21,6	4,9	128	49	87	1536
Froðubik 15 cm	[%]	21%	22%	14%	-53%	-12%	-15%	-23%
1-m2; st. 830-1.220	1999	347	17	2,8	245			
Styrkt 30.09.2000	2015	408	20,6	3,3	170	41	99	1291
Froðubik 12 cm	[%]	15%	17%	15%	-44%			
1-m2; st. 1.139-2.730	2008	341	17,6	3,2	209	47	113	1498
Styrkt 27.06.2009	2015	358	18,1	3,2	199	48	114	1455
Froðubik 15 cm	[%]	5%	3%	0%	-5%	2%	1%	-3%

1-m2; st. 2.730-5.898	1999	199	11,1	3,8	343			
Styrkt 29.07.2006	2015	274	15,3	4,4	199	63	134	1961
Froðubik 15 cm	[%]	27%	27%	14%	-72%			

Niðurstöður falllóðsmælinganna eru teknar lítillaga saman hér að neðan:

- Yfirborðsstífnin er að aukast um 5-37% við styrkinguna. Yfirborðsstífnin virðist aukast jafnar þar sem notast er við bikþeytu borið saman við froðubik.
- B-stuðullinn eykst um 3-43%. Aftur virðist vera meiri stöðuleiki þar sem bikþeytan er notuð í samanburði við froðubikið, en fleiri mælingar þarf til staðfestingar.
- K stuðullinn eykst lítillaga en virðist enda í gildum á milli 3 og 5 sem gefur til kynna að helsti veikleiki byggingarinnar liggir í burðar- eða styrktarlaginu. Því hærrí sem stuðullinn er því neðar liggur veikleikinn og er því líklegt að helsti veikleikinn liggir í styrktarlaginu og þess vegna breytist stuðullinn lítið. Styrkingin í burðarlaginu virðist ekki vera nægjanleg til að vinna upp fyrir lélegt styrktarlag, það er að segja spennurnar sem styrktarlagið verður fyrir eru enn of miklar.
- SCI sem gefur til kynna stífnin efstu 30 cm vegbyggingarinnar minnar um 5-80% sem gefur til kynna að niðurbeygjur í efsta hluta vegbyggingarinnar eru minni heldur en fyrir styrkingu. Breytileikinn í þessum mælingum er mikill, en breytileikinn er minni þegar lítið er til mælinganna fyrir bikþeytuna. Fleiri mælingar þarf til staðfestingar.
- BCI sem gefur til kynna stífnin neðstu laga vegbyggingar. Stuðullinn rokkar frá -50% upp í 29% þannig að í einhverjum tilfellum er niðurbeygjan að aukast eftir styrkingu. Í einhverjum tilfellum var ekki unnt að reikna stuðullinn þar sem mælingar vantaði í réttari fjarlægð frá álagsmiðjunni.
- BDI sem er skemmdarstuðull burðarlags, eða mæld niðurbeygja á 30-60cm dýpi frá yfirborði breytist lítið sem gefur til kynna að bikbindingin nái ekki að dreifa álaginu betur niður á styrktarlagið en þess ber að geta að ekki var alltaf unnt að reikna stuðullinn vegna skorts á mælipunktum.
- AUPP eða flatarmál sigdældarinnar er mjög breytileg en minnkar í flestum tilfellum þar sem unnt var að mæla hana fyrir og eftir styrkingu.

Til þess að fá frekari upplýsingar um vegspottanna sem hérna voru til skoðunnar var haft samband við Ingva Árnason hjá Vegagerðinni í Borgarnesi.

- Vegur 1-m2, 1-k8, 1-k7 burðarlag fest með froðubiki. Framkvæmdin gekk vel án nokkurra uppákoma. Breytileiki í mælingum á þessum vegum er töluverður.
- Vegur 1-h4, vandræði voru með festun sumarið 2006 vegna bleytu og var hluti vegarins þess vegna endurgerður sumarið á eftir (st. 7753-8637). Froðubik er viðkvæmt fyrir bleytu og þess vegna er ekki mælt til að framkvæma festun með froðubiki síðla sumars.

Teknir voru kjarnar úr 35-01, og kleyfnibrotþol mælt, sbr. grein 4.3 en kleyfnibrotþolið

5.3 Vegir sem er keyrt í án frekari styrkingar eða endurbyggðir að hluta

Til að bera saman kosti styrkinga þá voru teknir nokkrir kaflar þar sem einungis var þurrfræst, þverhalli jafnaður og ný klæðing lögð eða vegirnir endurbyggðir að hluta með styrktarlagi frá 10-45 cm, 15 cm burðarlagi og klæðingu. Þetta er algeng aðgerð þegar laga þarf þverhalla, jafna yfirborð vega og breikka. Í mörgum tilfellum eru til falllóðsmælingar fyrir og eftir endurlögn og því hægt að meta hvort endurlögnin hafi einhver áhrif á styrk vegbyggingarinnar. Myndir fyrir mismunandi stuðla fyrir hvern vegkafla eru í kafla 6 og viðauka C, en þær gefa til kynna að smá aukning verður í styrk þegar vegur er endurbyggður 60 cm niður fyrir yfirborðið en sama og engin breyting verður á styrk þegar vegur er endurbyggður 25-35 cm niður fyrir yfirborðið. Í Skálholtsvegi (31-01) var falllóðsmælingin eftir endurbætur framkvæmd einungis 2 mánuðum eftir að klæðing hafði verið sett á, því á einhver þjöppun hugsanlega eftir að eiga sér stað sem skýrir örlítið hærra niðurbeygjur eftir að vegurinn var lagaður. Fróðlegt væri að skoða fleiri kafla til að gera betur grein fyrir hversu mikið þarf að endurbyggja veginn til þess að styrkur hans aukist.

Vegkaflarnir þar sem hafði verið þurrfræst, keyrt í, jafnað og lögð á ný klæðing og skoðaðir voru sérstaklega eru:

Vegur 1-k8 stöðvar 4570-10380

25.06.2011

- Styrktarlag → malað 0-64 / 0-100, þykkt 10-20 cm
- Burðarlag → malað 0-25, þykkt 15 cm
- Klæðing K1F 11-16
- Klæðing K1F 8-11 (30.07.2011)

Vegur 1-m2 stöðvar 0-830

30.09.2000

- Styrktarlag → óunnið, þykkt 45 cm
- Burðarlag → malað 0-25, þykkt 15 cm
- Klæðing K2F 8-16

Vegur 31-01 stöðvar 6740-9310

01.08.2015

- Þurrfræsing → þykkt 20 cm
- Klæðing 11/16
- Klæðing 8/11

Niðurstöður falllóðsmælinganna eru teknar lítillaga saman hér að neðan (Tafla 14):

- Yfirborðsstífnin er að aukast um 28% í vegi 1-m2 þar sem vegurinn var endurbyggður efstu 60 cm en þar sem endurbyggingin var einungis 25-35 cm í kafla 1-k8 jókst yfirborðsstífnin um 16%. Þar sem einungis var þurrfræst og jafnað sbr. Vegkafla 31-01 minnkaði yfirborðsstífnin en eins og fram hefur komið var mælingin gerð 2 mánuðum eftir yfirlögn.
- B-stuðulinn eykst um 33% á kafla 1-m2 en um 8% á kafla 1-k8 þar sem þykkt endurbyggingar var þynnri.
- K stuðulinn eykst um 12% í 1-m2 en um 5% í 1-k8, en stuðulinn er 3,7; 4,1 og 3,3 sem gefur til kynna að veikleiki vegbyggingarinnar sé í burðar- eða styrktarlagi.

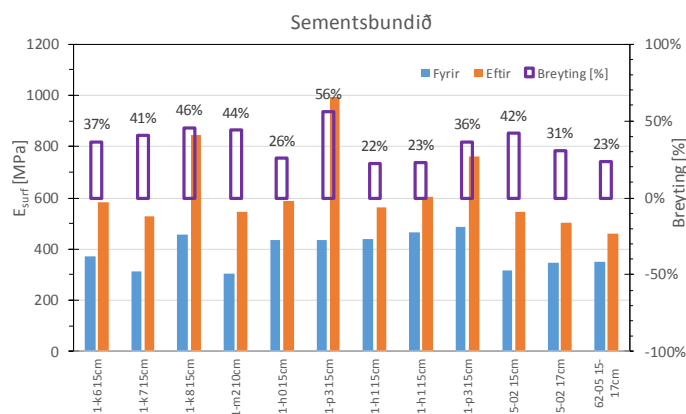
- SCI sem gefur til kynna stífni efstu 30 cm vegbyggingarinnar. SCI minnkar um 70 og 14% fyrir 1-m2 og 1-k8. Niðurbeygjur í efsta hluta vegbyggingarinnar eru minni heldur en fyrir endurbyggingu og minnka meira eftir því sem endurbyggingin fer dýpra.
- BCI sem gefur til kynna stífni neðstu laga vegbyggingar breytist ekki mikið en lækkar þó örlítið fyrir 1-k8 eða um 4% en ekki var unnt að meta stuðulinn fyrir 1-m2 vegna staðsetningar mælinema frá álagsmiðju við falllóðsmælingar.
- BDI sem er skemmdarstuðull burðarlags, eða mæld niðurbeygja á 30-60cm dýpi frá yfirborði. BDI minnkar um 2% í 1-k8 sem verður að teljast óverulegt en ekki var unnt að meta stuðulinn fyrir 1-m2 vegna staðsetningar mælinema frá álagsmiðju við falllóðsmælingar.
- AUPP eða flatarmál sigdældarinnar minnkar um 9% í 1-k8 en ekki var unnt að meta stuðulinn fyrir 1-m2 vegna staðsetningar mælinema frá álagsmiðju við falllóðsmælingar.

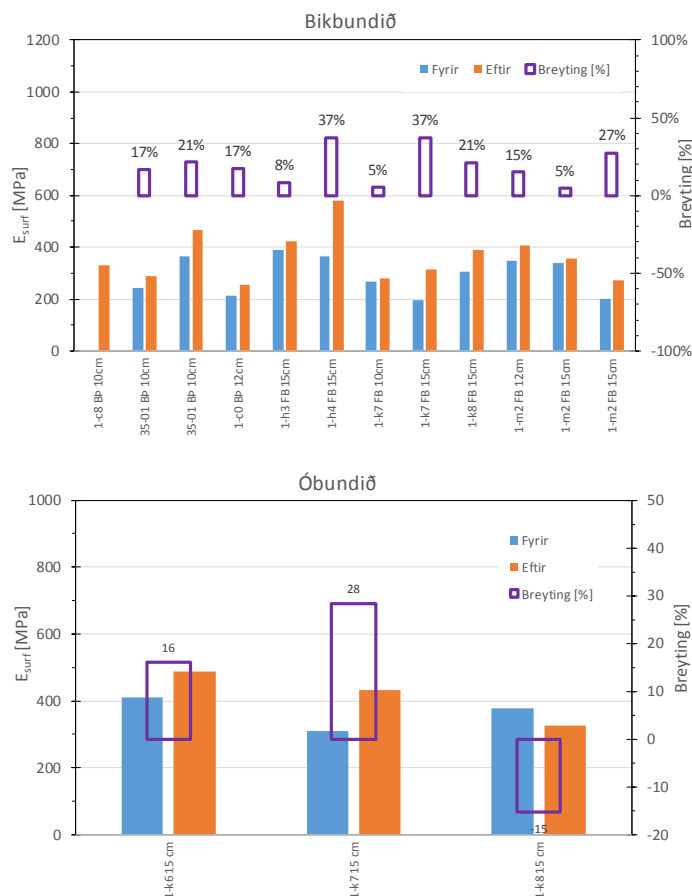
Tafla 14: Niðurstöður nýjustu mælinga og síðustu mælinga fyrir endurlögn, ásamt reiknuðum prósentumun mælinganna

	1-k8			1-m2			31-01		
	2004	2015	[%]	2006	2013	[%]	2004	2015	[%]
E _{surf} [MPa]	410	688	16	310	432	28	376	326	-15
B [tonn]	16,5	18	8	12,5	18,6	33	14,5	12,8	-13
K	3,5	3,7	5	3,6	4,1	12	3,6	3,3	-9
SCI	215	189	-14	314	185	-70	225	268	16
BCI	48	46	-4				48	49	2
BDI	105	103	-2				103	115	10
AUPP	1678	1542	-9				1953	2071	6

6 SAMANTEKT

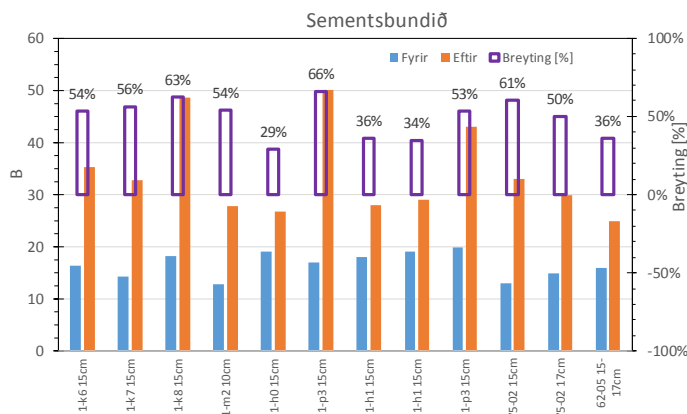
Þegar allar þessar mælingar eru teknar saman þá kemur greinilega í ljós meiri styrkukning sementsfestuninnar borið saman við bikfestun og óbundið burðarlag. Hérna er verið að notast við síðustu mælingu fyrir styrkingu og svo nýjustu mælingar. Ekki er talið rétt að nota fyrstu mælingu eftir styrkingu þar sem bikfestunin er töluverðan tíma að ná upp stryk. Hugsanlega væri rétt að nota mælingar sem teknar eru 2-5 árum eftir endurbætur en þegar myndir í viðaukum eru skoðaðar virðast vegbyggingarnar halda styrk sínum vel og skiptir þá ekki höfuðmáli hvaða mælingar eru notaðar eftir endurbætur. Á meðfylgjandi myndum ber að hafa í huga að Skálholtsvegur 31-01 var falllódsmældur skömmu eftir uppbyggingu og því hefur eftirþjöppun ekki átt sér stað en vonast er til að falllódsmæla veginn í sumar, tveimur árum eftir að hann var endurbættur.

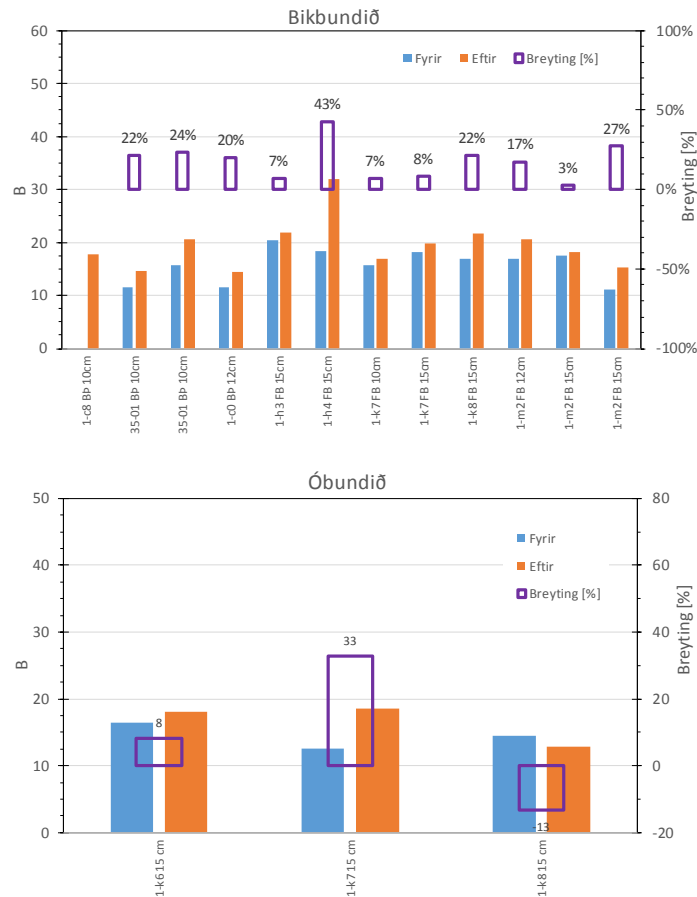




Mynd 31: Breyting á yfirborðsstífni vegna með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. Bp stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik.

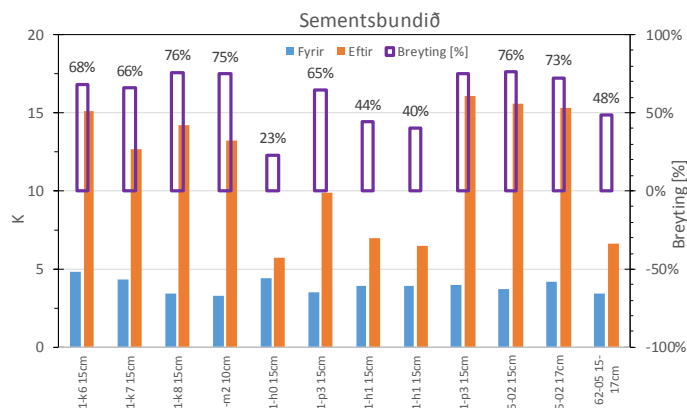
Þegar yfirborðsstífnin á Mynd 31 er skoðuð kemur greinilega í ljós meiri yfirborðsstífni sementsbundna burðarlagsins borið saman við bikbundna og óbundna burðarlagið. Fyrir styrkingu virðist yfirborðsstífnin vera á milli 200 og 400 MPa fyrir vegina sem á að bikbunda burðarlagið, en eftir styrkinguna eykst stífni bikbundna efnisins um 5-37% og verður í kringum 300-400 MPa. Þegar litið er til sementsstyrkta efnisins er yfirborðsstífnin milli 300 og 500 MPa fyrir styrkingu en eykst um 22-56% við sementsbindinguna. Yfirborðsstífni óbundnu kaflanna var heldur meiri í byrjun samanborið við kaflanna sem voru bikbundnir en yfirborðsstífnin er að aukast álíka mikið.

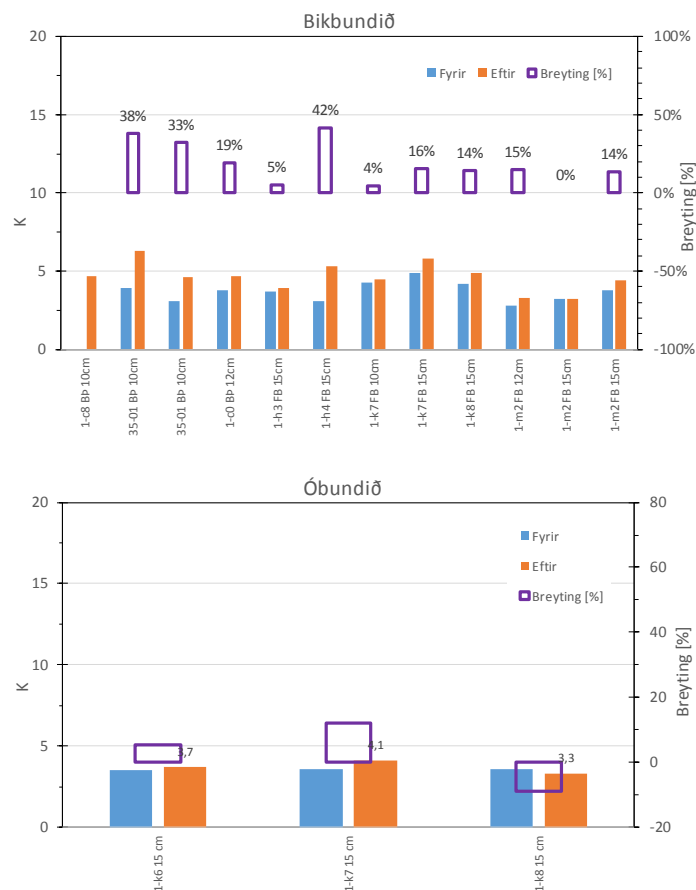




Mynd 32: Breyting á burðarstuðli (B) vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. Bp stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik.

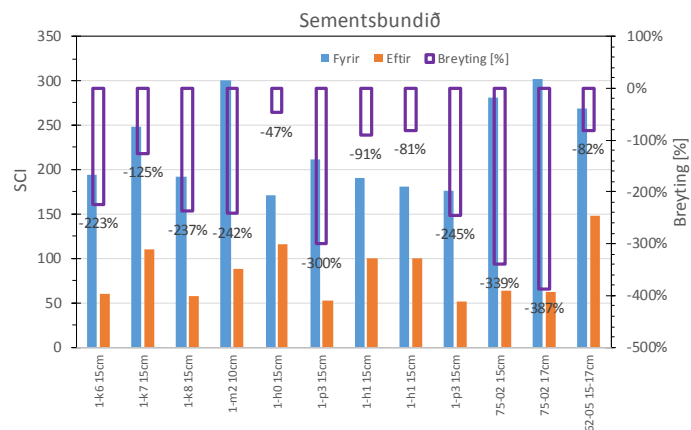
Eins og áður kemur fram skal taka burðarstuðulinn með fyrirvara en samt sem áður gefur hann einhverja mynd af þeim breytingum sem verða á burðargetu vegbygginga. Á Mynd 32 sést greinilega hvernig burðarstuðulinn eykst meira við sementsfestun burðarlags samanborið við bikbindingu og óbundið burðarlag.

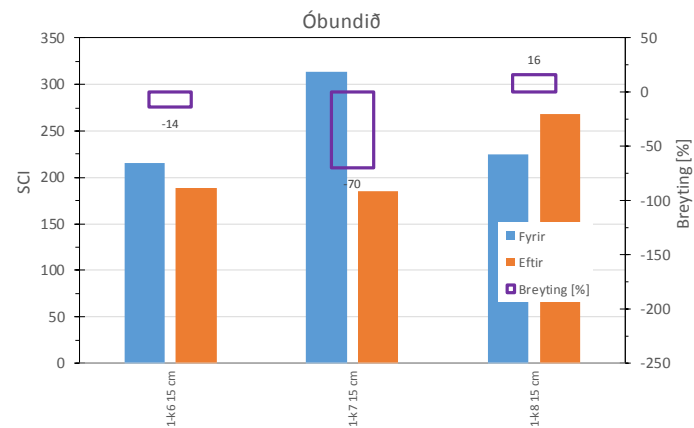
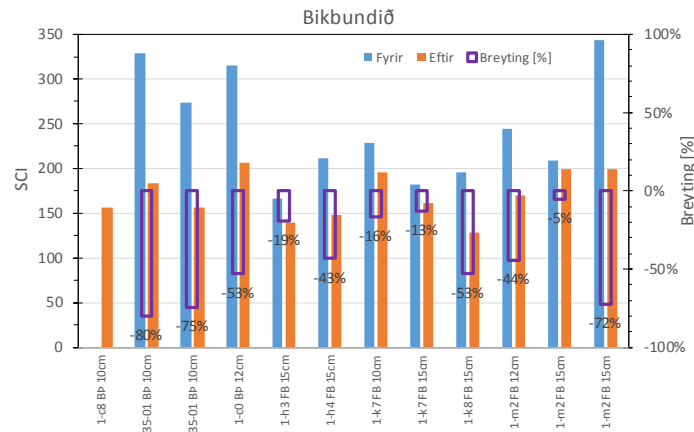




Mynd 33: Breyting á K-stuðli vegna með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik.

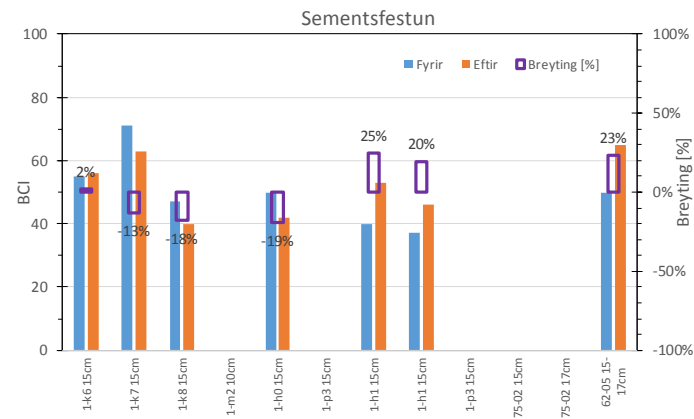
Þegar burðarlag vegar er styrkt með sementi þá eykst K stuðullinn (Mynd 33) í flestum tilfellum gríðarlega, væntanlega vegna aukinnar álgsdreifingar þegar vegbyggingin er að einhverju leyti orðin stíf og þess vegna virðist sem veikleiki vegbyggingarinnar sé komin neðst í undirlagið. Enn og aftur fylgjast bikbundna og óbundna burðarlagið að en þar virðist K stuðullinn dansa á milli 3 og 5 sem skv. norsku leiðbeiningunum gefur til kynna að helsti veikleikinn liggja í styrktarlaginu. Þar sem bikið viðheldur sveigjanleika vegbyggingarinnar er líklegt að álgsdreifingin verði ekki með sama hætti og þegar um stífa vegbyggingu er að ræða.

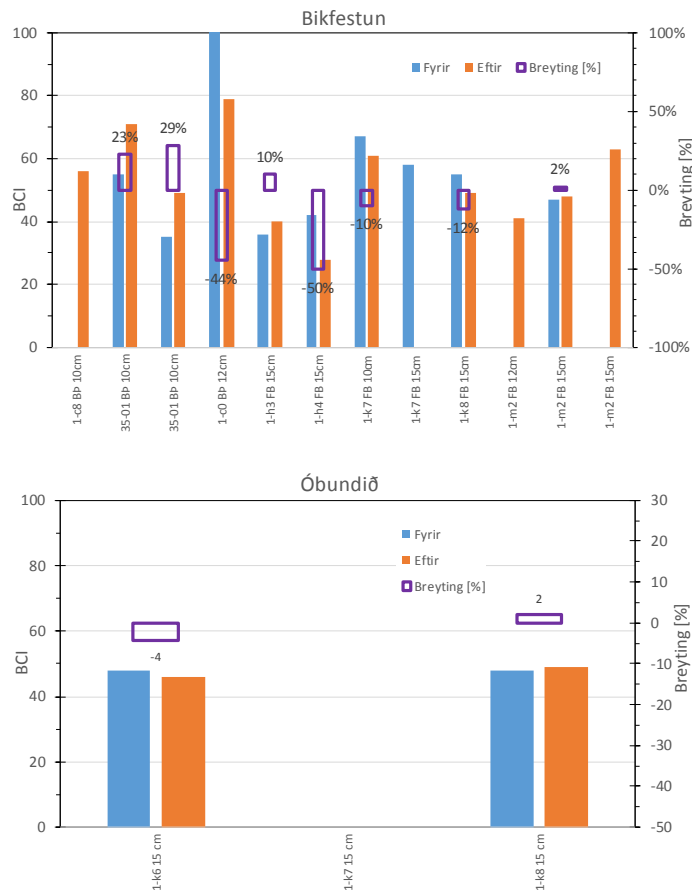




Mynd 34: Breyting á krappa yfirborðsins (SCI) vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik.

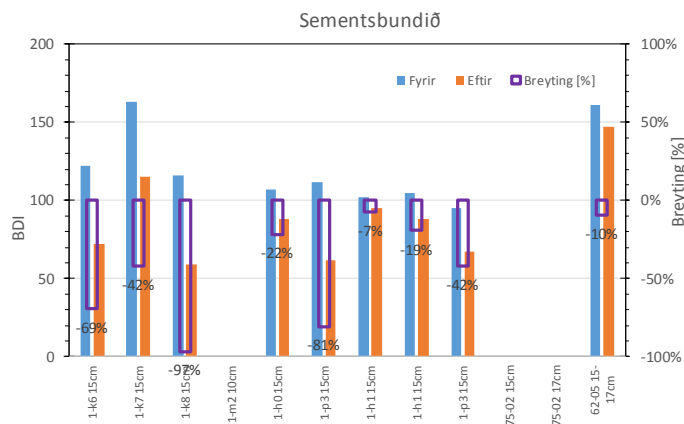
Á Mynd 34 er verið að bera saman mældar niðurbeygjur á efstu 30 cm vegbyggingarinnar. Töluverður breytileiki er í mælingunum en í öllum tilfellum minnkar niðurbeygjan eftir styrkingu en niðurbeygjan minnkar greinilega meira þar sem burðarlagið er sementsbundið og er SCI stuðullinn í flestum tilfellum undir 100. Þar sem burðarlagið er bikbundið virðist niðurbeygjan vera á milli 150 og 200 og í kringum 200 þar sem burðarlagið er óbundið.

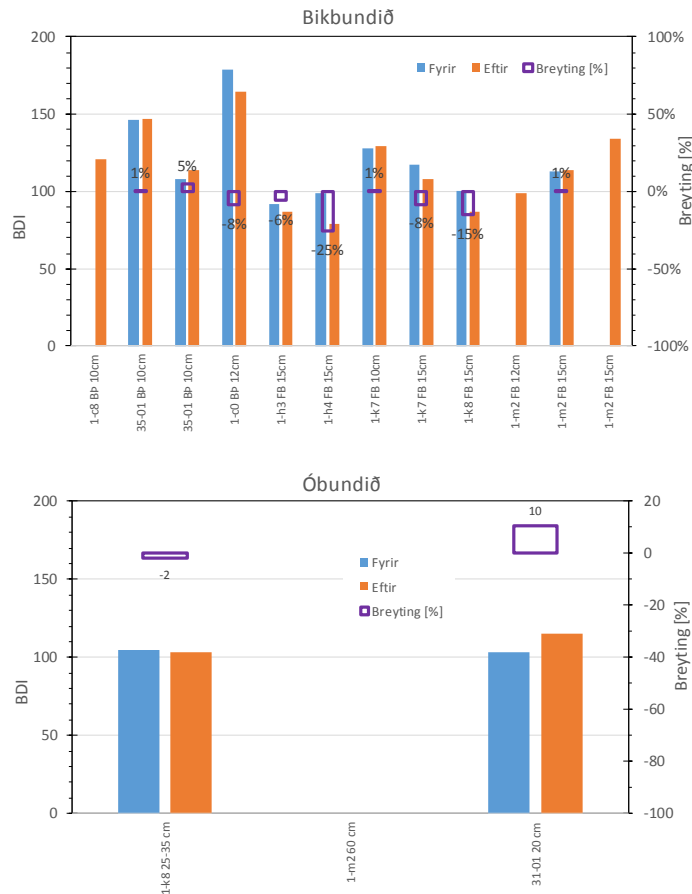




Mynd 35: Breyting á krappa burðarlagsins (BCI) vegna með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik.

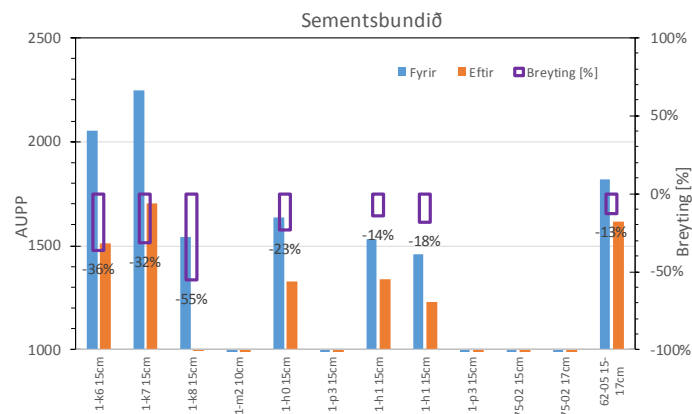
Krappi burðarlagsins (Mynd 35) breytist lítið enda er verið að skoða breytingu á niðurbeygju á 60-90 cm dýpi. Töluverðar sveiflur eru í breytingunni sem og mælingunum en stöðugleikinn virðist vera meiri þar sem er óbundið burðarlag og sementsbundið borið saman við mælingarnar þar sem burðarlagið er bikbundið. Svo virðist sem bikbindingin gefi mjög breytilegar niðurstöður og þar sem burðarlagið er óbundið virðist krappi burðarlagsins ekki vera að breytast. Í sumum tilvikum var ekki unnt að mæla BCI vegna ónógra mælipunkta við falllóðsmælingar.

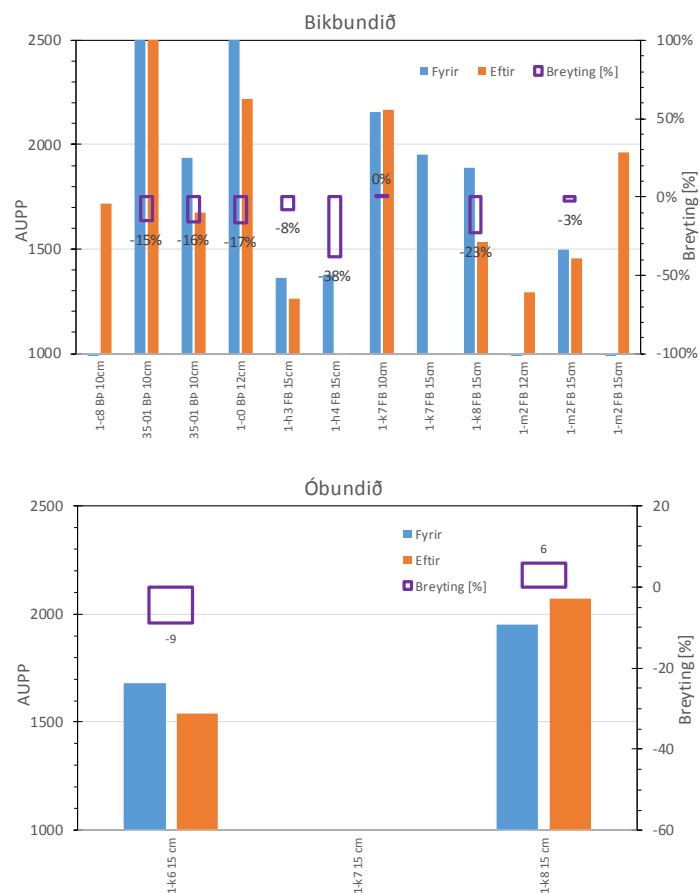




Mynd 36: Breyting á skemmdarstuðli burðarlags (BDI) vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlög. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik.

Skemmdarstuðull burðarlags sýnir breytingu á niðurbeygju á 30-60 cm dýpi. Á Mynd 36 sést breyting á stuðlinum og hvernig niðurbeygjan lækkar mun meira þar sem vegurinn er sementsbundin. Því virðist sem sementsbindingin dreifi álaginu betur vegna aukinnar stífni samanborið við bik og óbundin burðarlög.





Mynd 37: Breyting á flatarmáli sigdældar (AUPP) vega með sementsbundið, bikbundið og óbundið burðarlag. BP stendur fyrir bikþeyta og FB fyrir froðubik.

Mælt flatarmál undir sigdældinni (Mynd 37) minnkaði umtalsvert í flestum tilfellum en erfitt er að meta breytinguna á sumum stöðum þar sem mælingarpunktur falllóðsins voru ekki nægilega reglulegir til þess að reikna flatarmálið en gera má ráð fyrir að flatarmálið minnki þegar litið er til mældu niðurbeygjupunktanna.

7 LOKAORÐ

Heimildum kemur saman um að skoða þurfi vel staðhætti þar sem endurbóta á vegum er þörf. Finna verður rót vandans áður en ráðist er í að laga vandann. Skoða þarf hvert tilfelli fyrir sig og gera prufu kjarna til þess að ákvarða magn bindiefnis og vatns í blöndunni. Oft eru margir samhangandi þættir sem valda niðurbroti vega og þess vegna þarf oft að sameina aðferðir til endurbóta. Samhliða styrkingum er mælt til að kanna afvötnun og bæta úr ef þess er talin þörf. Oftast er fjárhagsáætlun til styrkinga og endurbóta mun lægri heldur en þörfin og því mikilvægt að taka vel upplýstar ákvarðanir þannig að fjármunirnir nýtist sem best.

Frumathuganir gefa til kynna að festun burðarlags skili töluvert auknum styrk borið saman við óbundin burðarlög. Þegar litið er til tegundar festunnar þá verður að hafa í huga að sementsfestun gefur stífa vegbyggingu á meðan bikið gefur sveigjanlega. Þannig gefur sementið aukinn yfirborðsstyrk, minni niðurbeygju og minna álag á undirlagið borið saman við bikbindingu. Þá virðist sem sementsfestunin gefi jafnari niðurstöður. Þar sem hætta er á frostlyftingum eða öðrum mismunahreyfingum í vegbyggingunni er mælt til að nota bik til festunar sem viðheldur sveigjanlegri hegðun og á þess vegna betra með að taka upp hreyfingar. Svo virðist sem bikfestun sé viðkvæmari fyrir úrkomu og hitastigi við útlögn borið saman við sementsfestunina sem getur að hluta til skýrt aukinn breytileika, en einnig er verið að nota tvær gerðir biks, froðubik og bikþeytu. Meiri stöðugleiki virðist vera við nokkun bikþeytu en vegkaflarnir eru einnig færri þar sem bikþeytan er notuð borið saman við froðubikið.

Lítill munur sést á niðurstöðum falllódsmælinga hvort heldur sem sementsfestunin er 10 eða 17 cm en lang algengast er að 15 cm þykkt burðarlag sé styrkt með sementi. Þess ber þó að geta að sementsmagn, vatnsmagn, steinefni, undirbygging og undirlag hafa mikil áhrif á festunina og einungis einn kafli er styrktur með 10 cm.

Niðurstöður í verkefninu koma að mörgu leyti á óvart og mörgum spurningum enn ósvarað. Það kemur á óvart hversu lítil áhrif bikbinding burðarlagsins hefur á styrk vegarins, en styrkurinn virðist endast vel með tíma. Þetta þarfnast nánari athugunar, þ.a. í sumar er fyrirhugað að taka kjarna úr vegunum og bera saman við niðurstöður falllódsmælinga.

Almennt þarf að kortleggja frekar staðarhætti, efni undirbyggingar og undirlags á vegum sem hafa verið festir til þess að hægt sé að varpa frekara ljósi á þær spurningar sem enn er ósvarað. Einnig verður farið

Í að bakreikna falllóðsmælingarnar til þess að geta greint betur hvar veikleikar veganna liggja fyrir og eftir endurbætur.

Kanna þarf betur hvernig stýra skuli magni bindiefnis fyrir íslenslar aðstæður og fylliefni. Hvenær heppilegt sé að festa og hvenær nægjanlegt er að nota óbundið burðarlag.

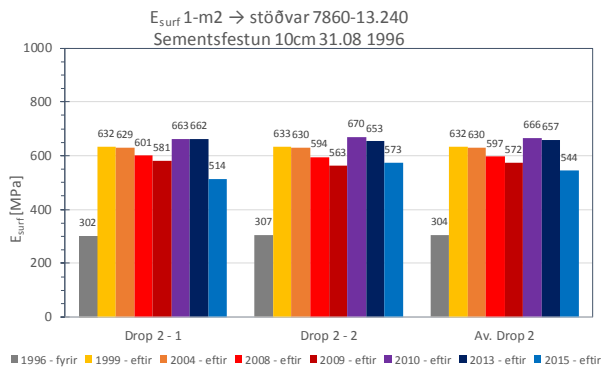
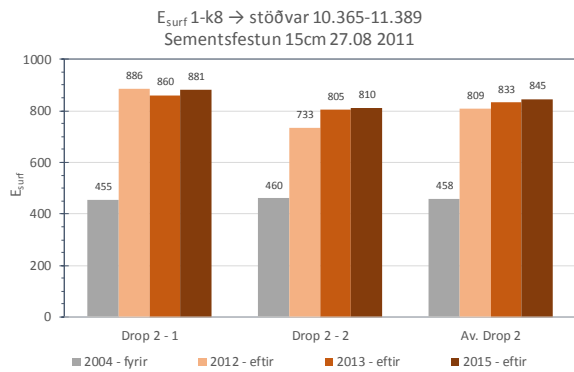
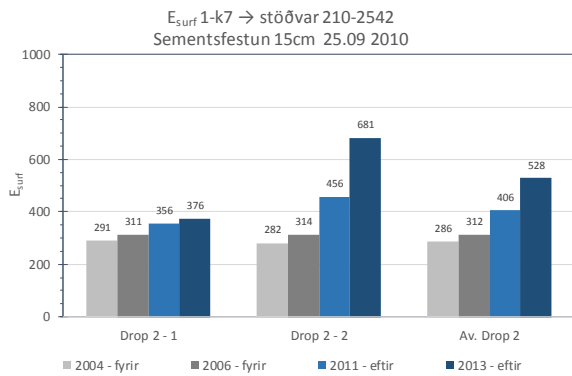
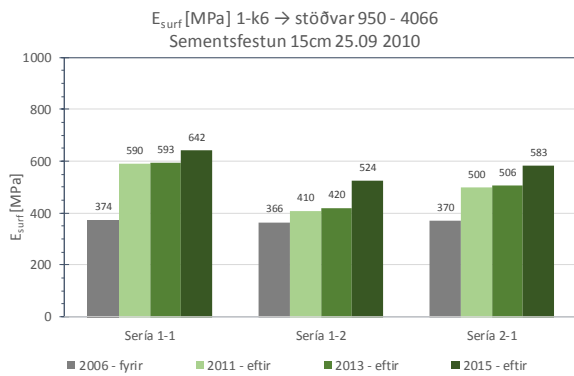
HEIMILDIR

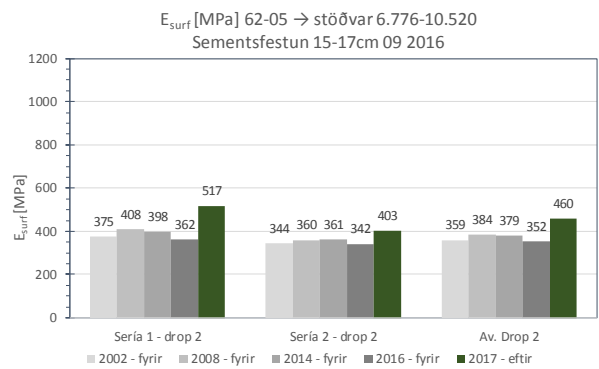
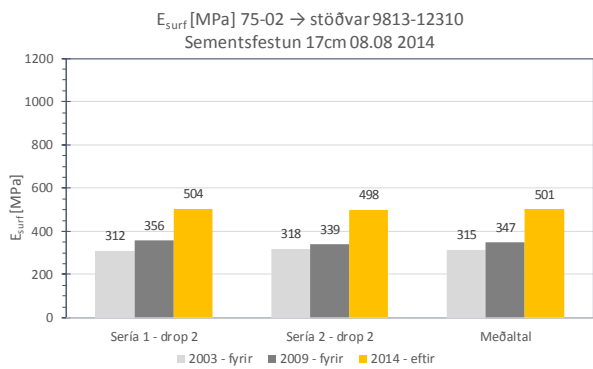
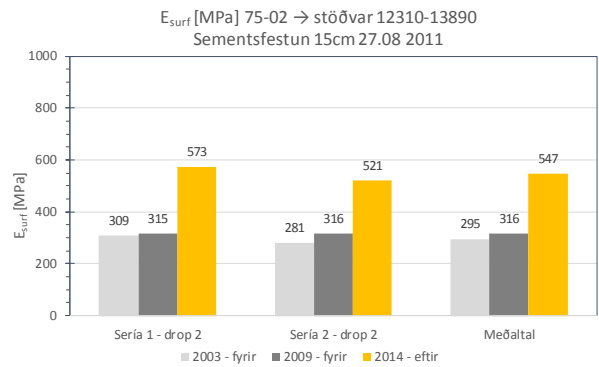
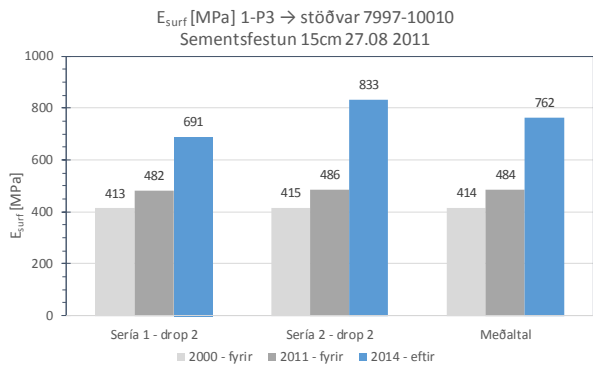
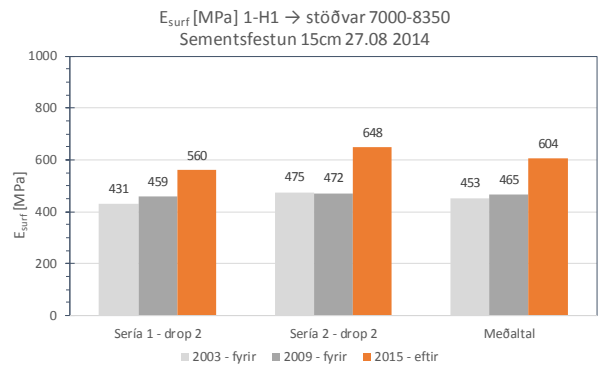
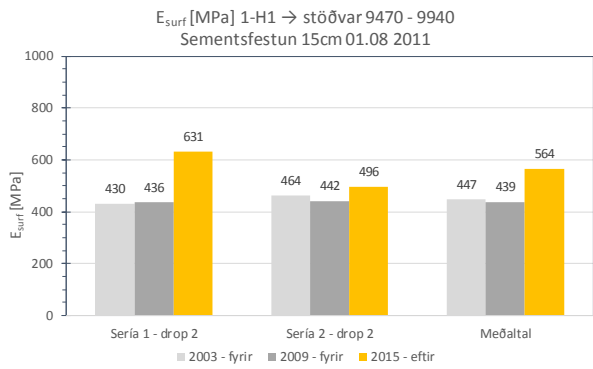
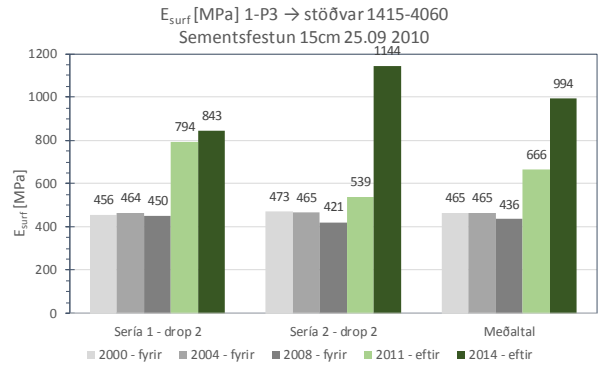
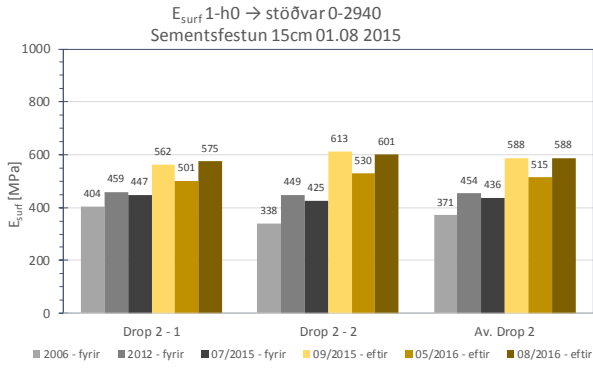
- Aho, Sara; Sarrenketo, Timo; Berntsen, Geir; Dawson, Andrew; Kolisoja, Pauli & Munro, Ron (2005). Structural Innovations, A Summary of ROADEX II Project Phase II Reports. ROADEX II Project, Scotland.
- Alabaster, D; Patrick, J; Arampamoorthy, H & Gonzalez, A (2013). The design of stabilised pavements in New Zealand. New Zealand Transport Agency research report 498.
- Austroroads (2004). Pavement design: a guide to the structural design of road pavements. Austroroads, Sydney, Ástralíu.
- Einar Gíslason, Guðmundur Ingi Waage, Guðmundur Ragnarsson og Igvi Árnason (2013). Leiðbeiningar fyrir framkvæmd og eftirlit með sementsfestun. Vegagerðin, Reykjavík, Ísland.
- Guðmundur I. Waage (2011). Sementsfestun og breikkun á hringvegi 2010, skýrsla um framkvæmd. Vegagerðin, Reykjavík, Ísland.
- Halsted, G. G.; Luhr, D. R. & Adaska, W. S. (2006). Guide to Cement-Reated Base (CTB). PCA, Portland Cement Association, Bandaríkjunum.
- Helga Þórunn Gunnlaugsdóttir (2008). Burður vega á þáatíma. Háskóli Íslands, Reykjavík, Ísland.
- Howard, I. L.; Sullican, W. G.; Anderson, B. K.; Shannon, J. & Cost, T. (2013). Design and Construction Control Guidance for Chemically Stabilized Pavement Base Layers, Final Report FHWA/MS-DOT-RD-13-206. Mississippi State University (MSU), Bandaríkjunum.
- Ingvi Árnason (2017). Samtöl og tölvupóstar höfunda við Ingva Árnason um reynslu festanna.
- Ingvi Árnason, Guðmundur Ingi Waage, Sigursteinn Hjartarson (2012). Kjarnar úr festum vegum. Vegagerðin og SHj. ehf., Íslandi.
- Karsten Iversen & Þórir Ingason (1995). Sementsfestun burðarlaga – framkvæmdatilraunir á Nesvegi við Hafnir. BUSL – Burðarlaganefnd, skýrsla B-4. BUSL, Íslandi.
- Kristján Ingi Arnarsson (2011). Sementsfestun burðarlaga. Lokaverkefni í byggingartæknifræði BSc., Háskólinn í Reykjavík, Íslandi.
- Njörður Tryggvason (1996a). Sementsfestun burðarlaga – Vegstyrking með sementsfestu – stutt grainaferð – áfangaskýrsla. BUSL – Burðarlaganefnd, skýrsla B-5. BUSL, Íslandi.
- Njörður Tryggvason (1996b). Sementsfestun í Langadal, Ágúst 1996, Framkvæmdaskýrsla. Íslenskir Aðalverktakar hf & Sementsverksmiðjan hf, Íslandi.

- Refsdal, Geir (2007). Forsterkning av veg. Kynning flutt 24.april 2007. Statens vegvesen, Noregi.
- RSTA & ADEPT (2012). Code of Practice for In-situ Structural Road Recycling. RSTA (Road Surface Treatments Association) & ADEPT (Association of Directors of Environment, Economy, Planning and Transport), Bretlandi.
- Statens Vegvesen (2015). Forsterkninger av vegar, varige vegar 2011-2014, Statens Vegvesens Rapport nr. 373. Statens Vegvesen, Noregi.
- Statens vegvesen (2014a). Håndbok N200 – Vegbygging, normaler. Statens vegvesen, Noregi.
- Statens vegvesen (2014b). Håndbok R210 – Laboratorieundersøkelser. Statens vegvesen, Noregi.
- Statens vegvesen (2014c). Håndbok R211 – Feltundersøkelser. Statens vegvesen, Noregi.
- Theyse, H. L. & Muthen, M. (2001). Pavement analysis and design software (PADS) based on the South African mechanistic-empirical design method. Pretoria: Transportek CSIR, Suður-Afríku.
- Trafikverket (2012). Förstärkningsåtgärder. Trafikverket, Svíþjóð. ISBN: 978-91-7467-288-6.
- Transit (2008). TNZ B/5: 2008 – Specification for in-situ stabilisation of modified pavement layers. Transit New Zealand, Nýja Sjálandi.
- Valgeir Valgeirsson; Sigursteinn Hjartarson, Theodór Guðfinnsson; Ásbjörn Jóhannesson (2003). Viðhaldsaðferðir, BUSL – Slitlaganefnd. Vegagerðin, Reykjavík, Ísland.
- Vegagerðin (2017). Efnisrannsóknir og efniskröfur, Leiðbeiningar við hönnun, framleiðslu og framkvæmd. Vegagerðin, Reykjavík, Ísland.
- Vegagerðin (2016). Sementsfestun og þurrfræsing á Vestursvæði 2016, 1.hefti Útboðs- og verklýsing, Vg. 16-037. Vegagerðin, Íslandi.
- Vegagerðin (2015). Sementsfestun á Vestursvæði 2015, 1.hefti Útboðs- og verklýsing, Vg. 15-030. Vegagerðin, Íslandi.
- Vegagerðin (2013). Burðarþolshönnun, leiðbeiningar. Vegagerðin, Reykjavík, Ísland.
- Þórir Ingason (2004). Bikþeyta til festunar – Áfangaskýrsla 1, Skýrsla nr.04-05. Rannsóknarstofa byggingariðnaðarins. Reykjavík, Ísland.
- Þórir Ingason (1993). Festun burðarlaga. Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins, Íslandi.
- Þórir Ingason, Haraldur Sigursteinsson & Guðrún Dröfn Gunnarsdóttir (2000). Bikfestun burðarlaga – reynsla af tilraunum, lokskýrsla. BUSL – Burðarlaganefnd, skýrsla B-23. BUSL, Íslandi.

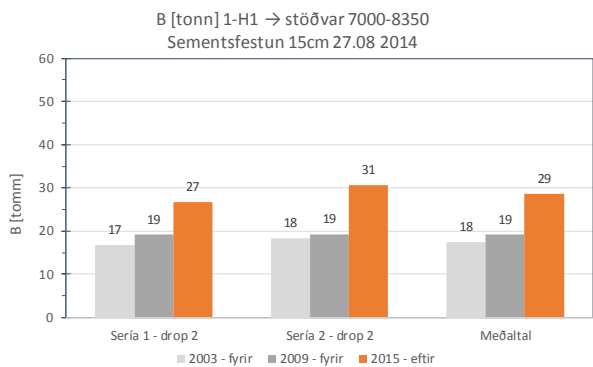
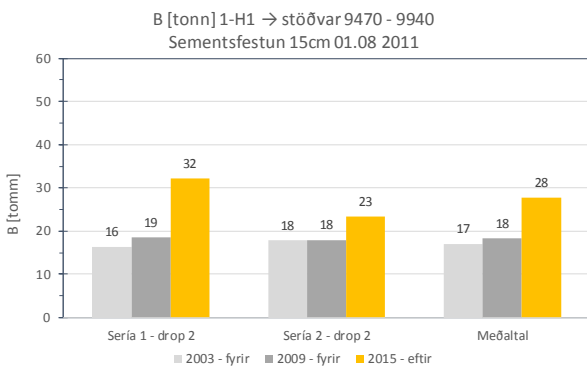
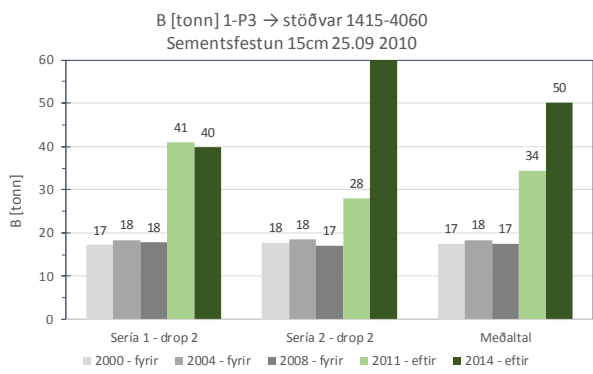
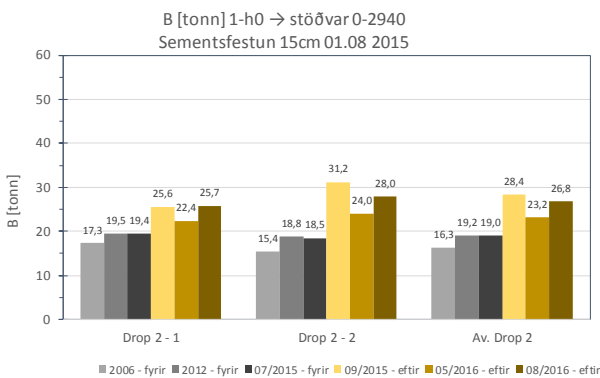
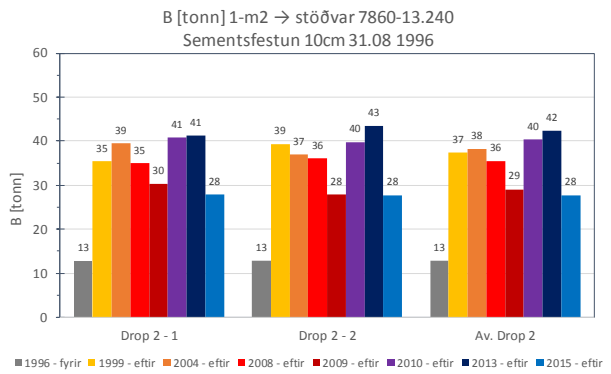
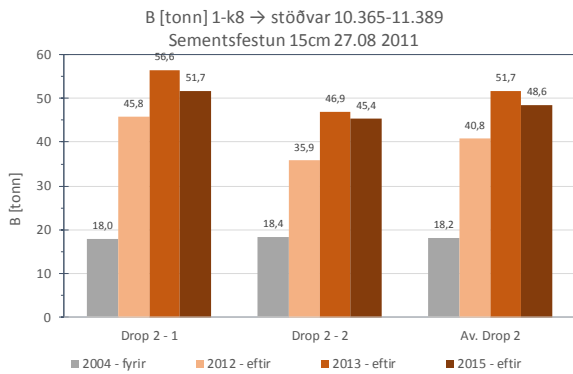
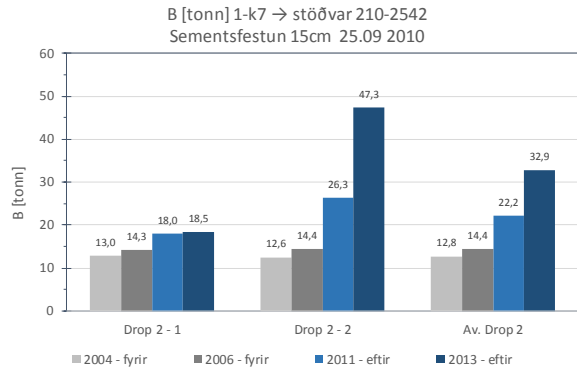
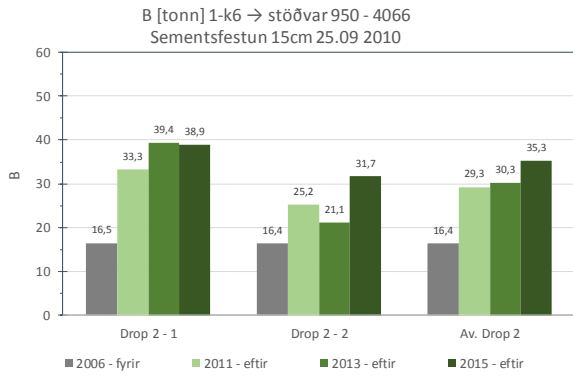
VIÐAUKI A SEMENTSSTYRKTIR VEGIR

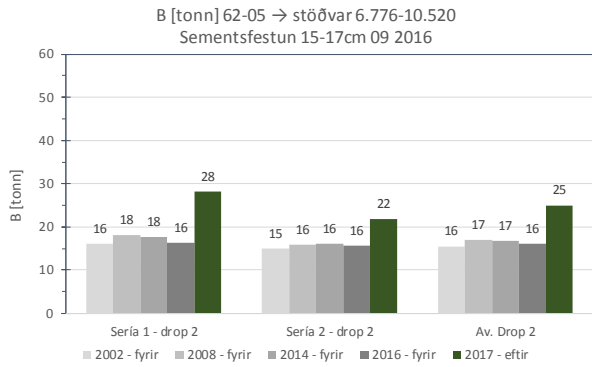
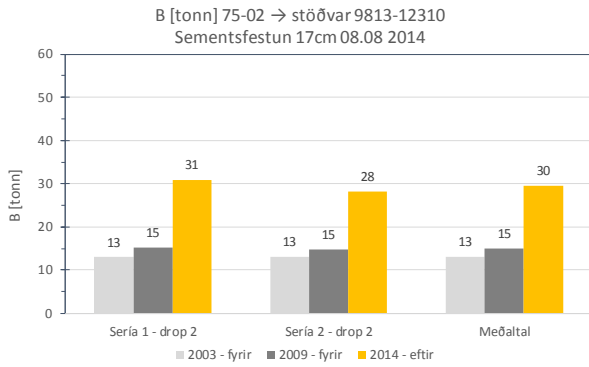
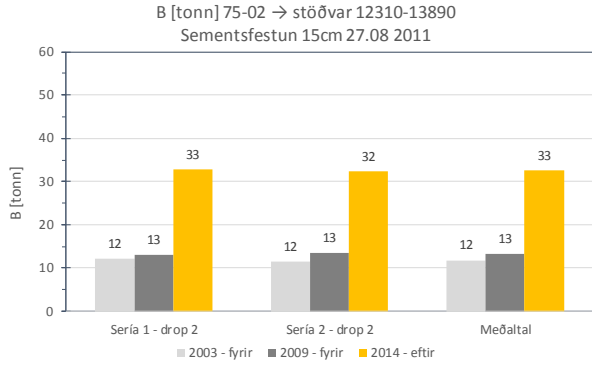
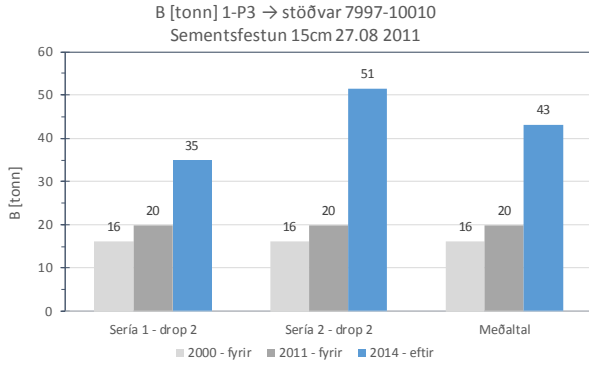
E_{surf} [MPa] – sementsfestun



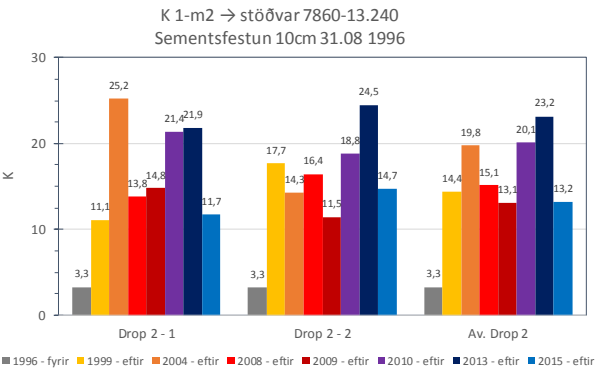
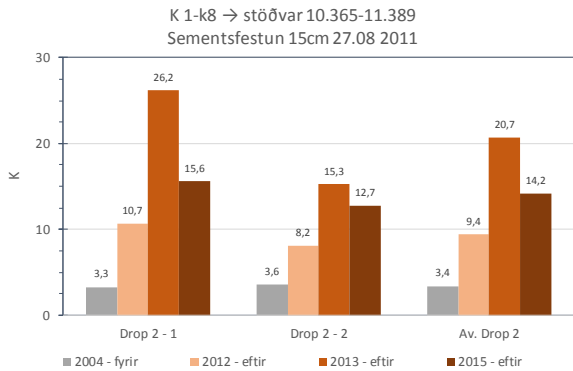
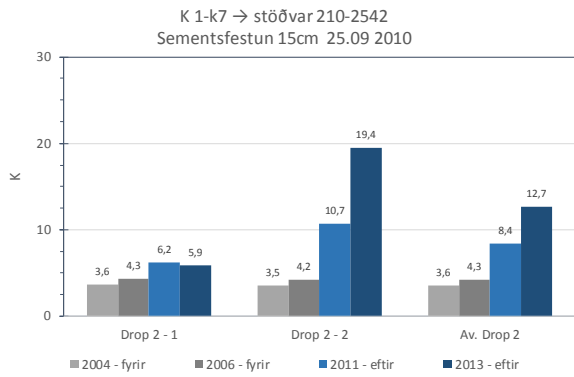
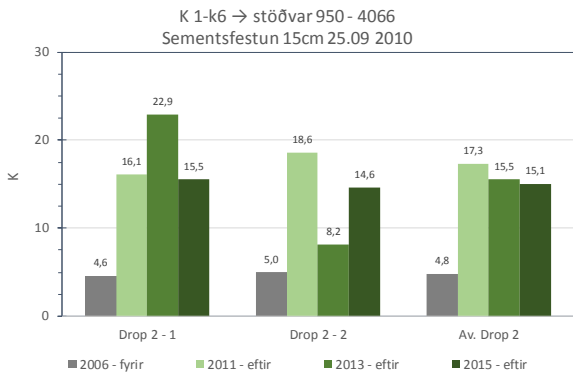


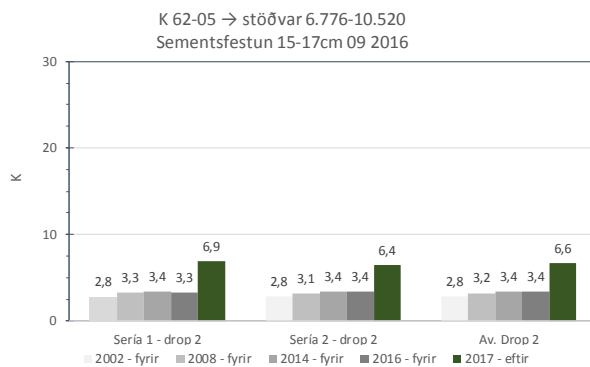
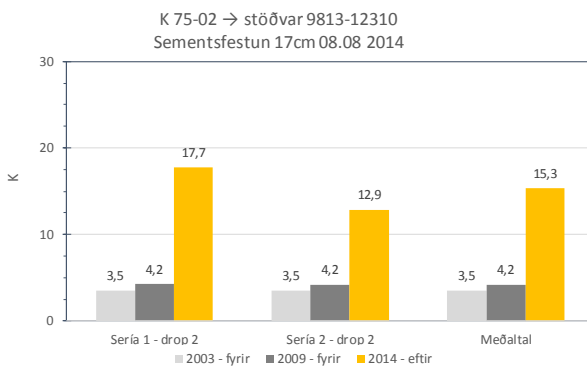
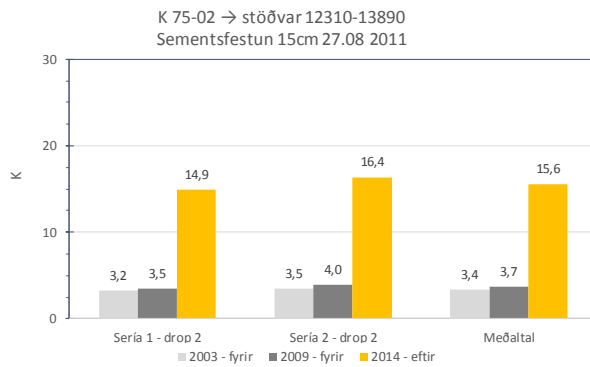
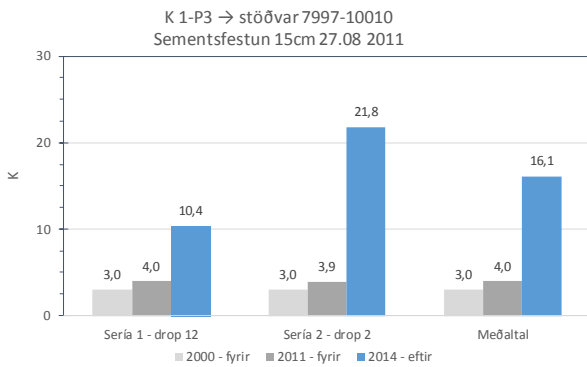
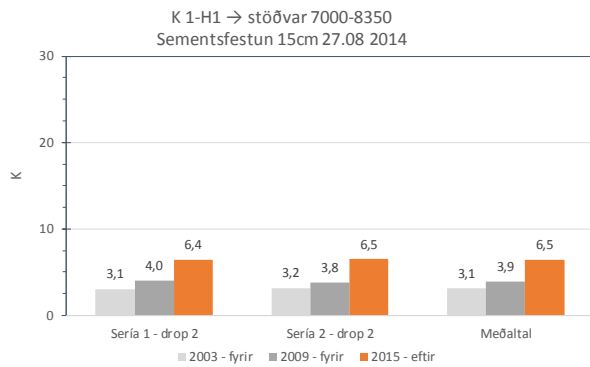
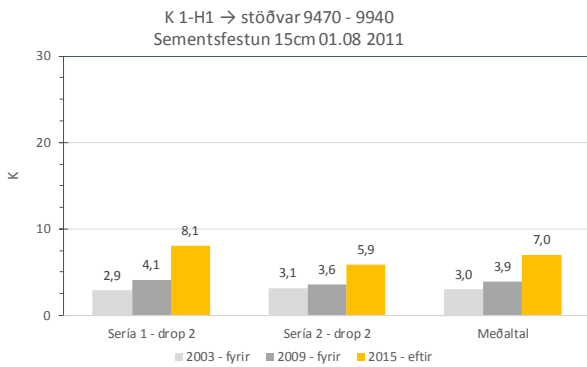
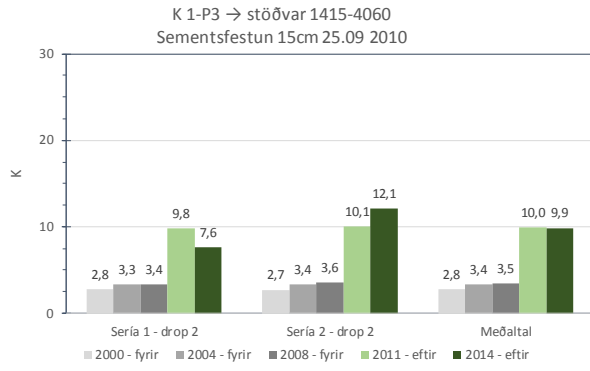
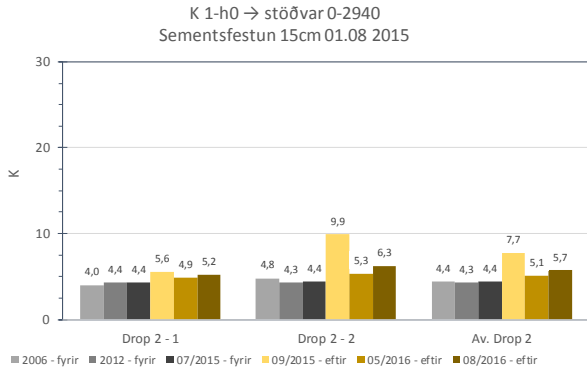
B [tonn] – sementsfestun



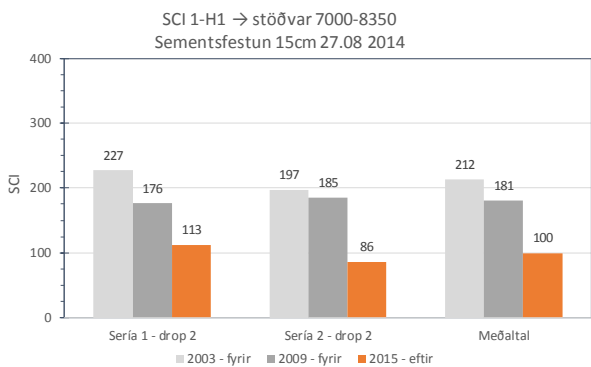
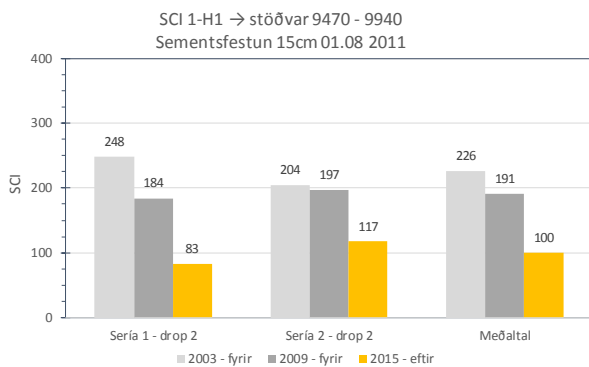
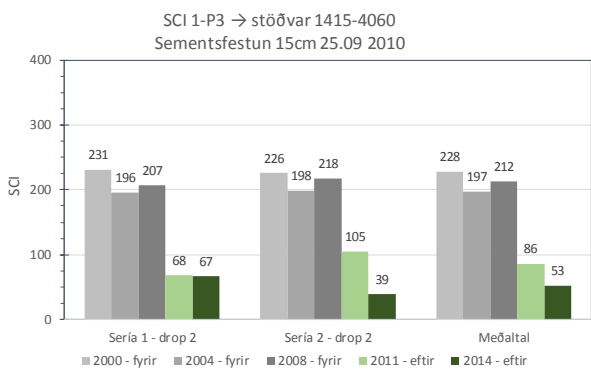
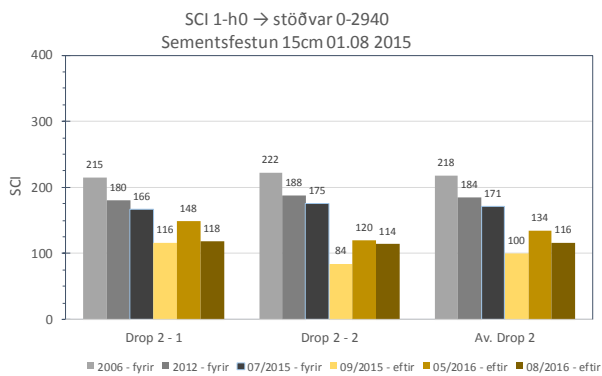
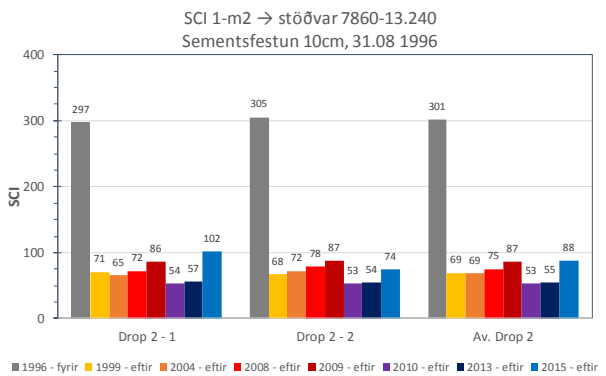
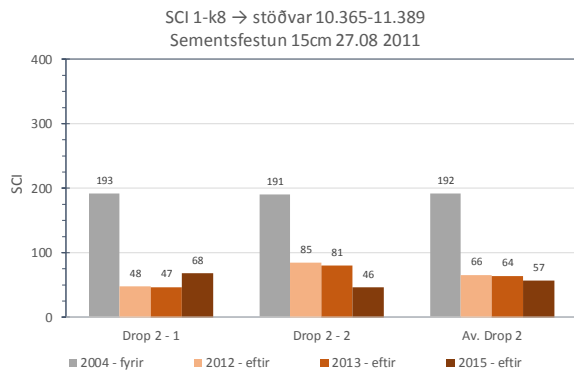
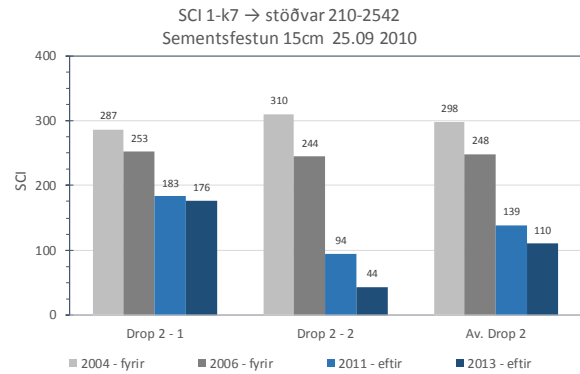
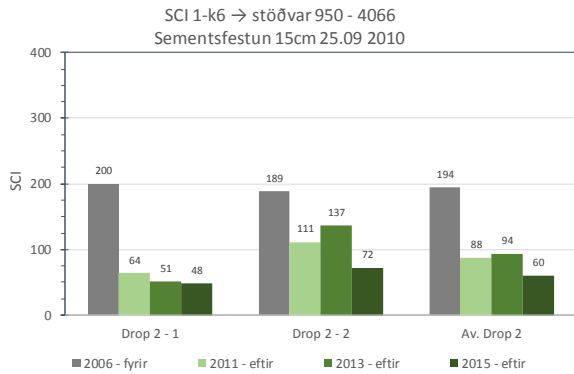


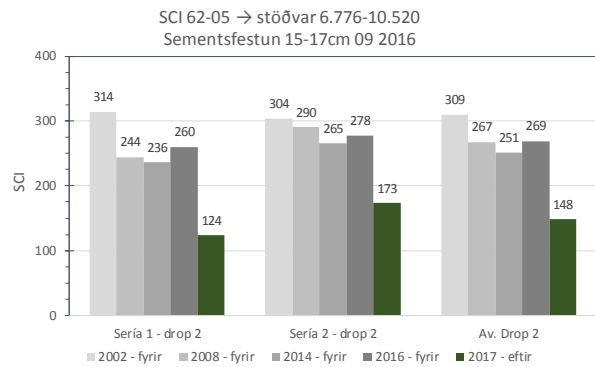
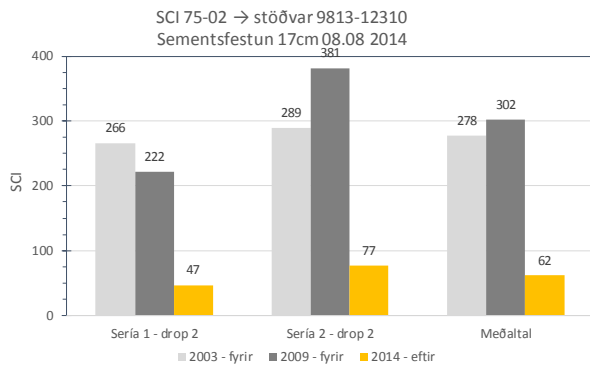
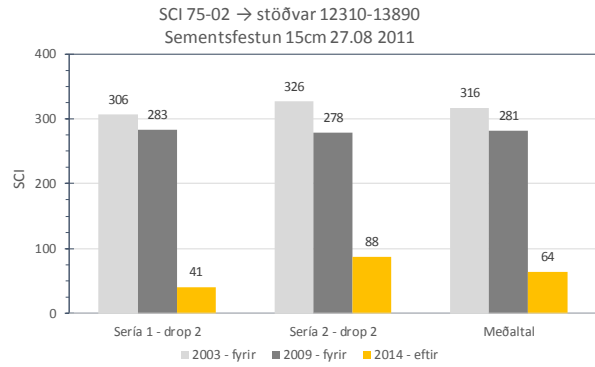
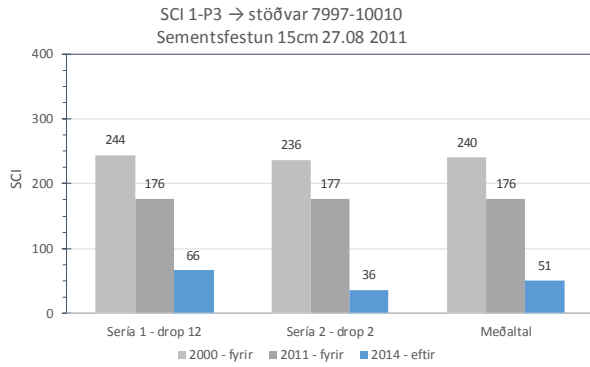
K – sementsfestun



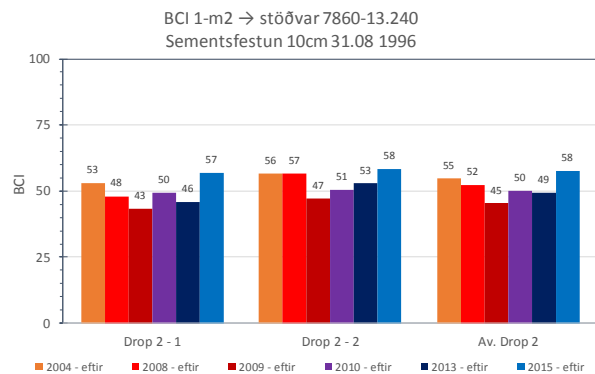
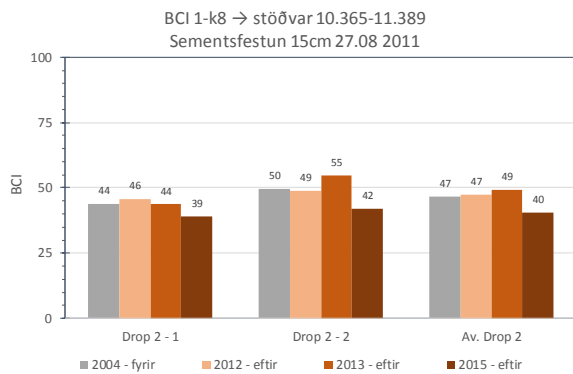
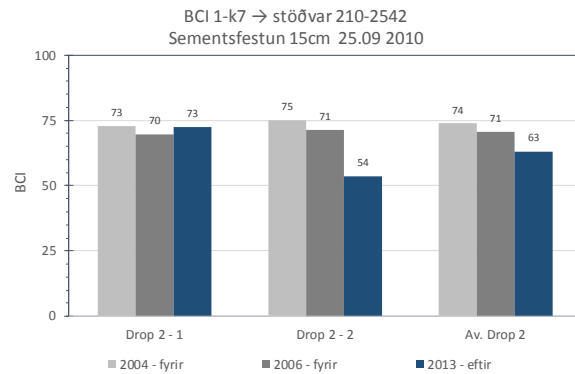
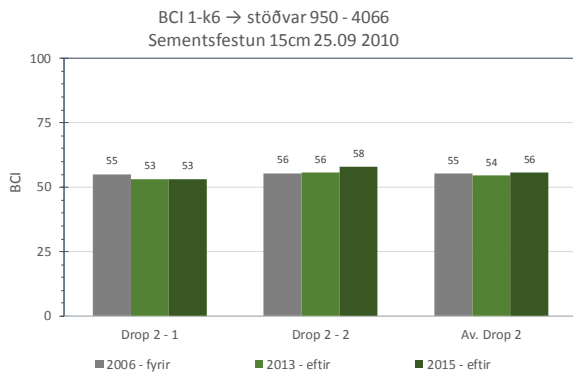


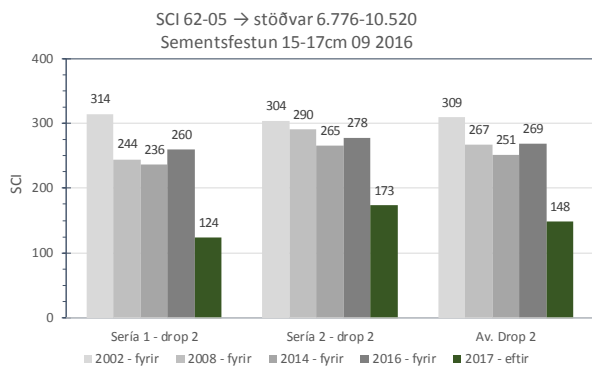
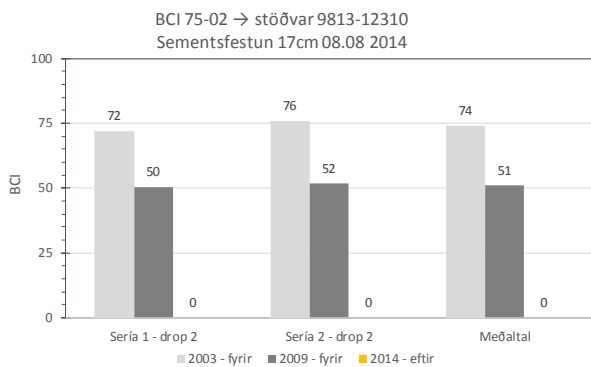
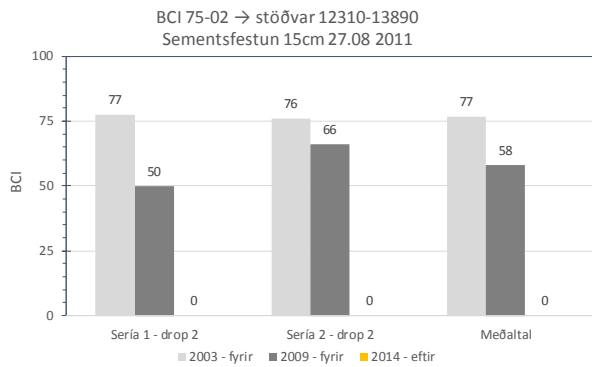
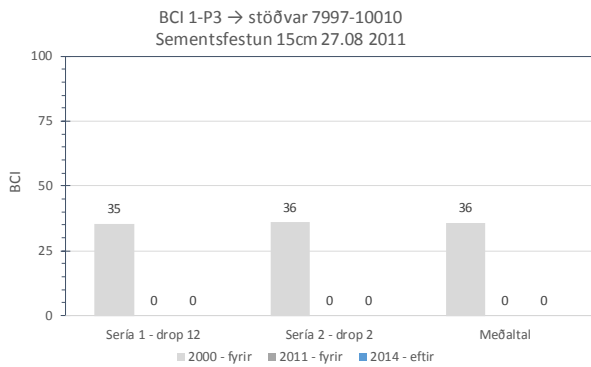
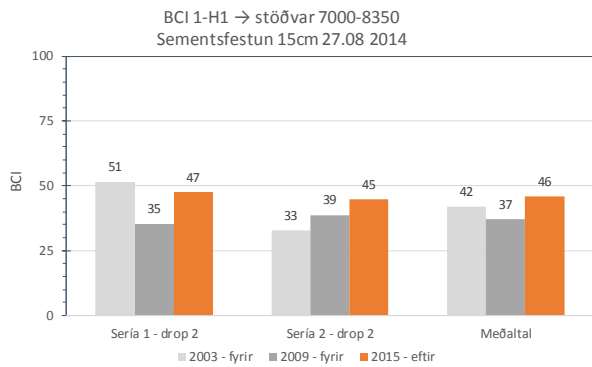
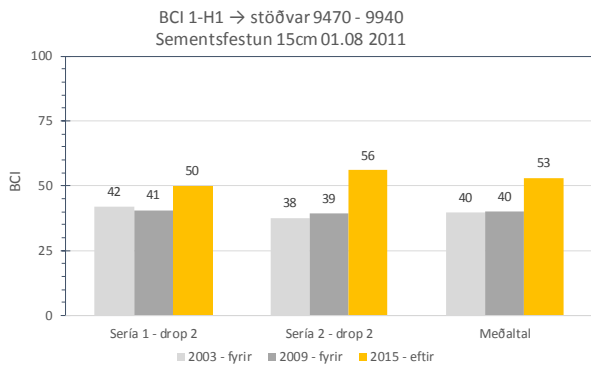
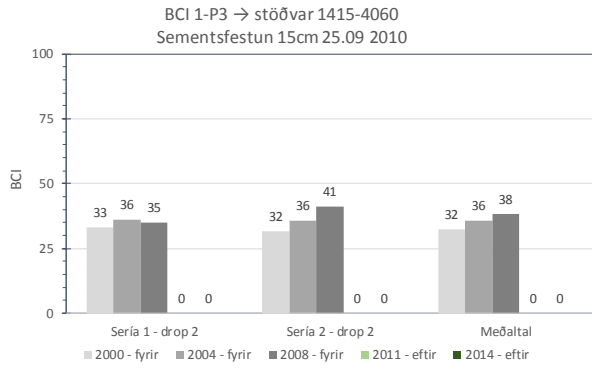
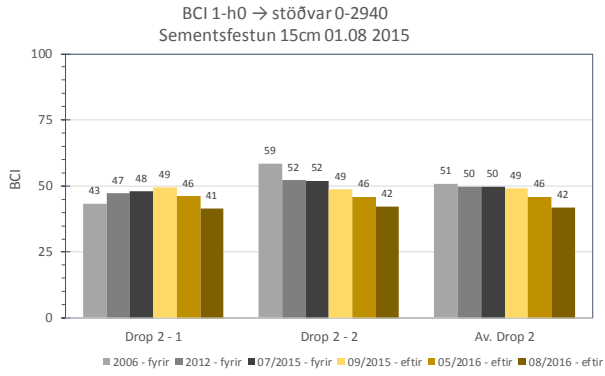
SCI – sementsfestun



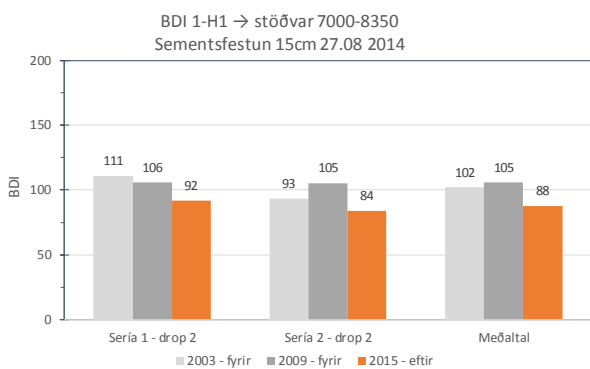
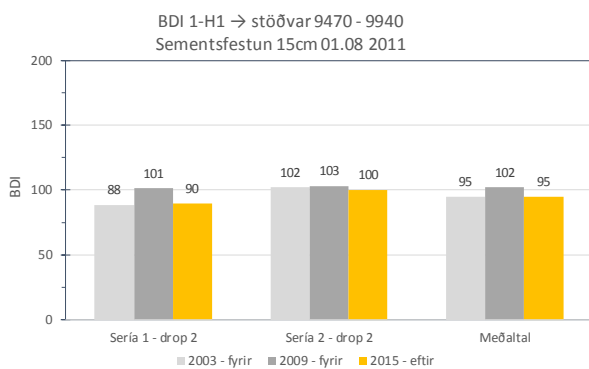
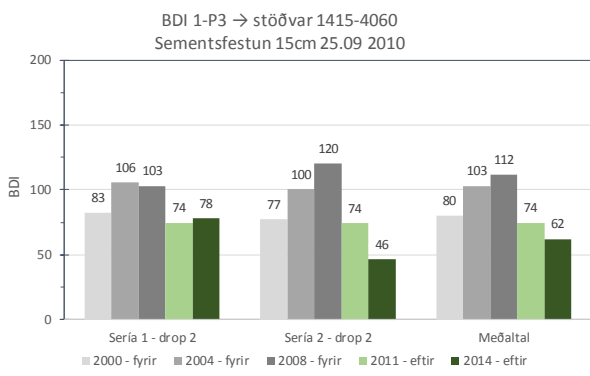
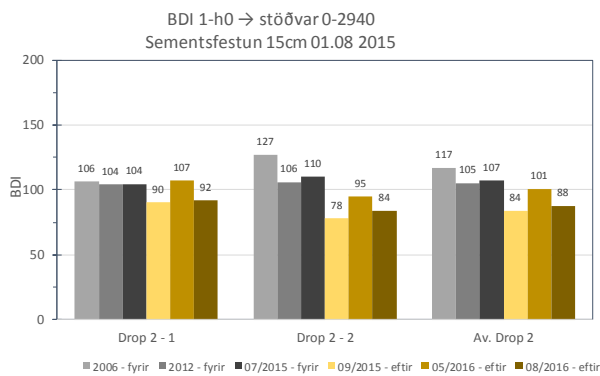
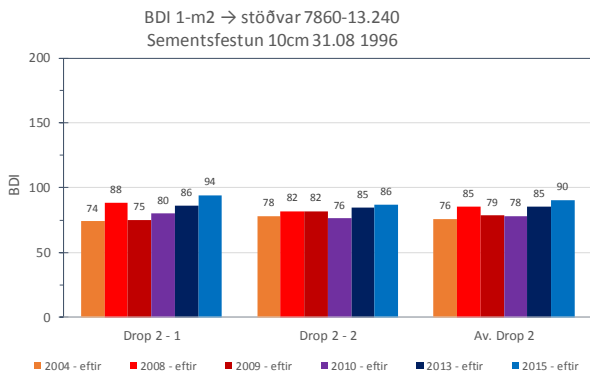
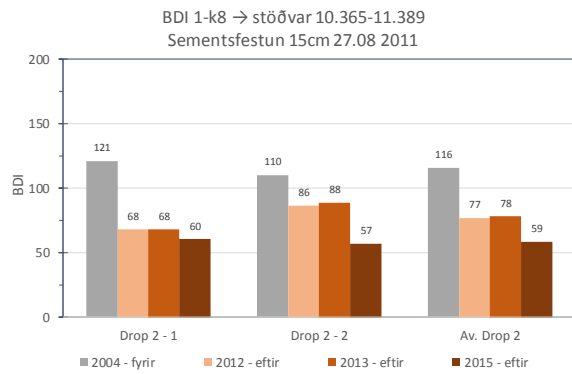
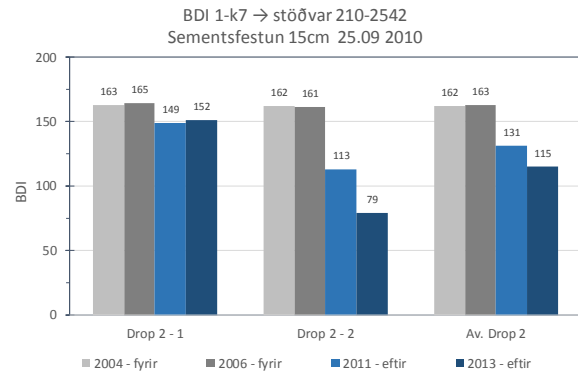
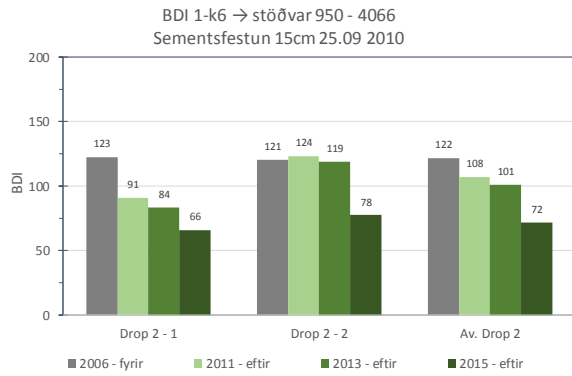


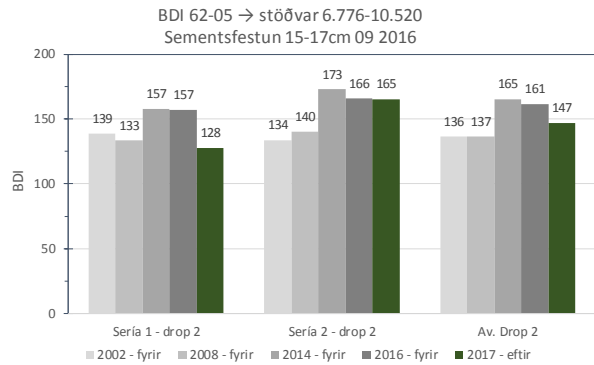
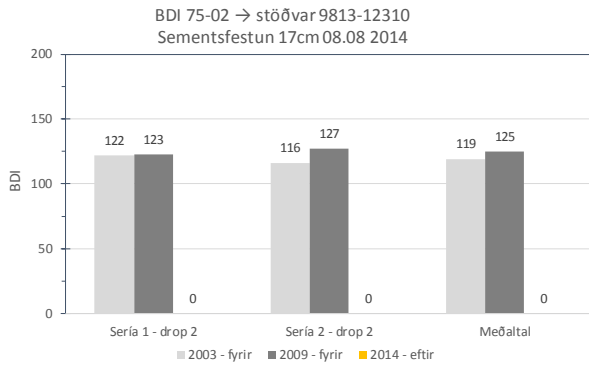
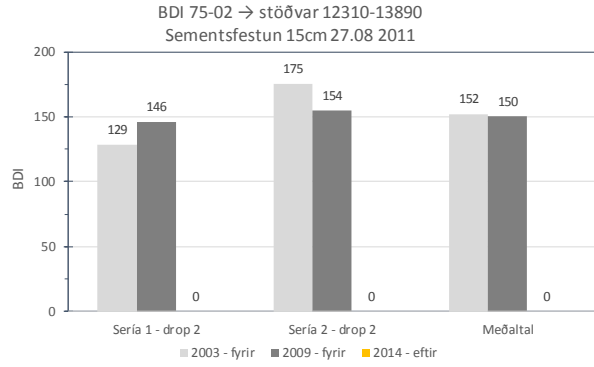
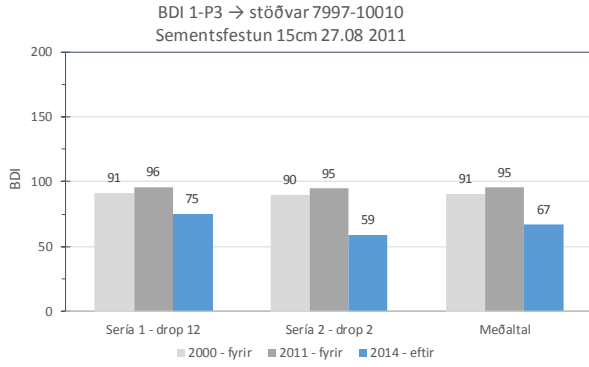
BCI – sementsfestun



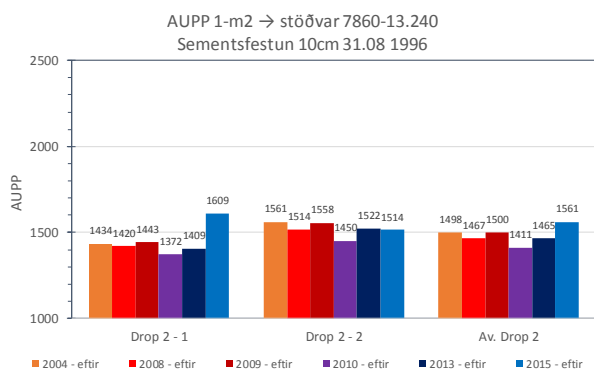
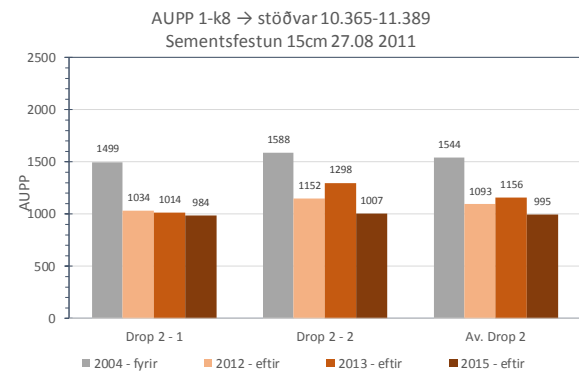
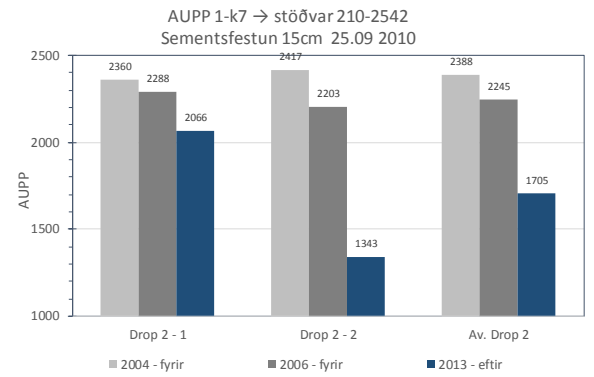
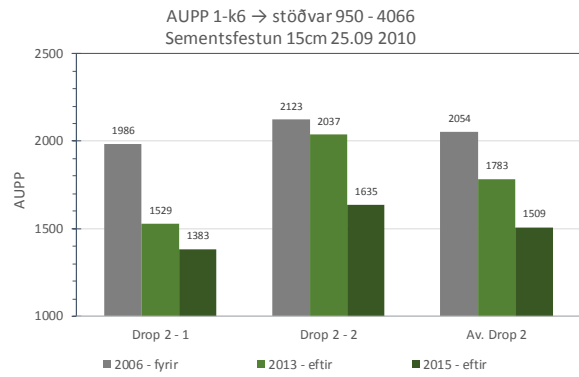


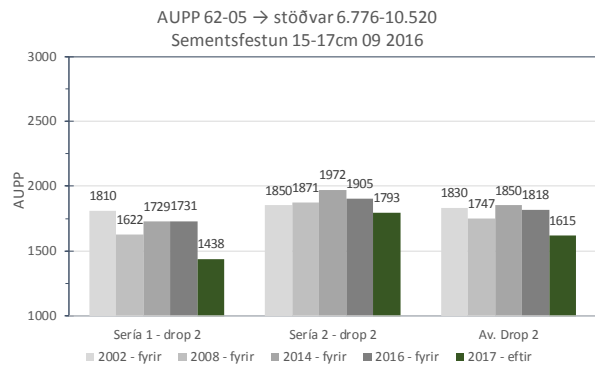
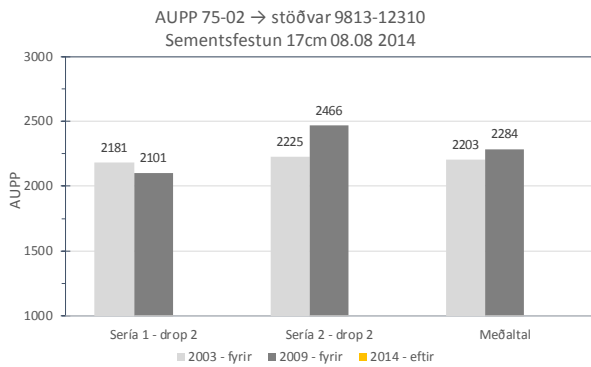
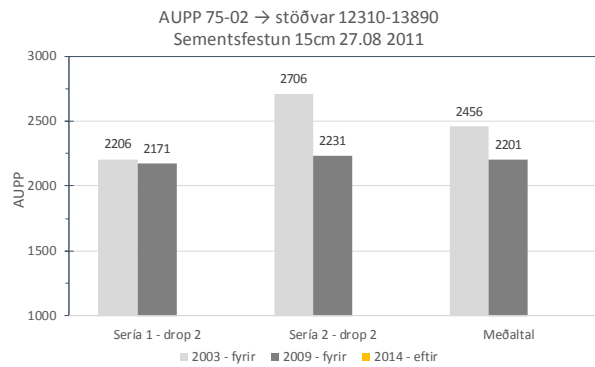
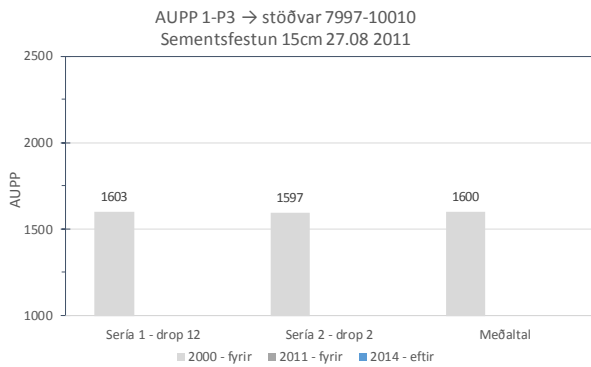
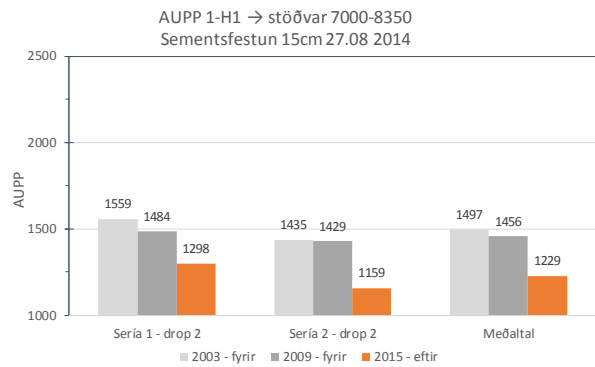
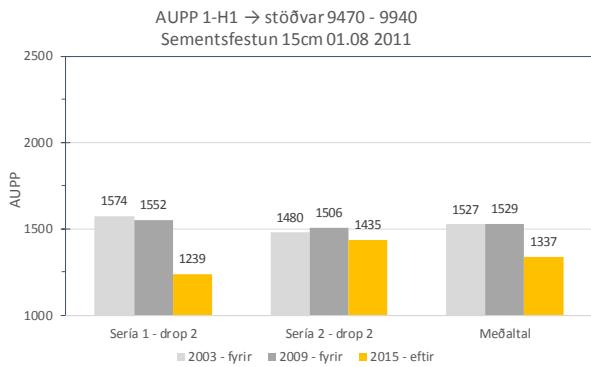
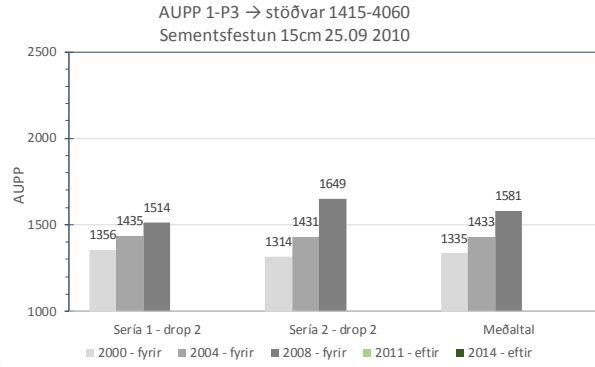
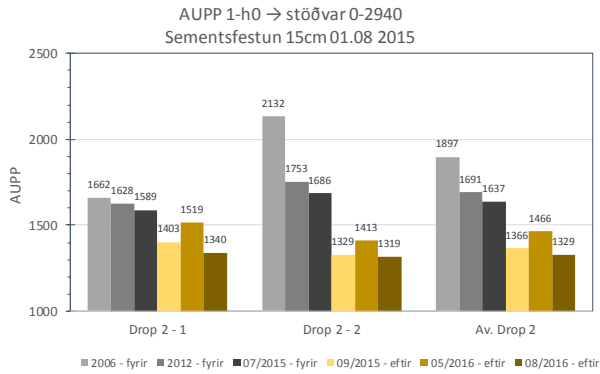
BDI – sementsfestun





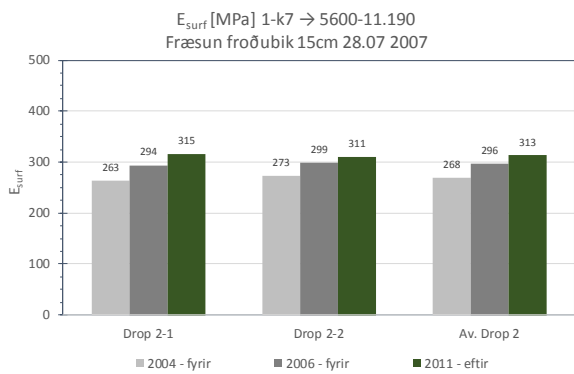
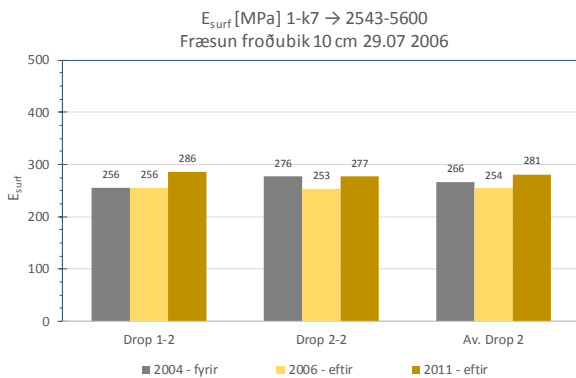
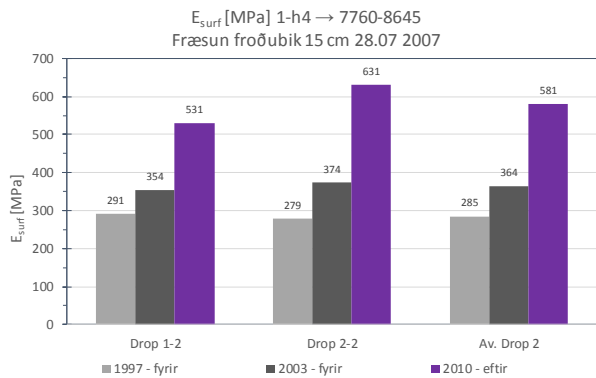
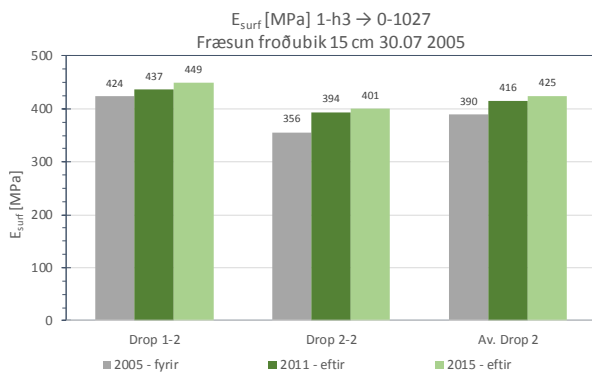
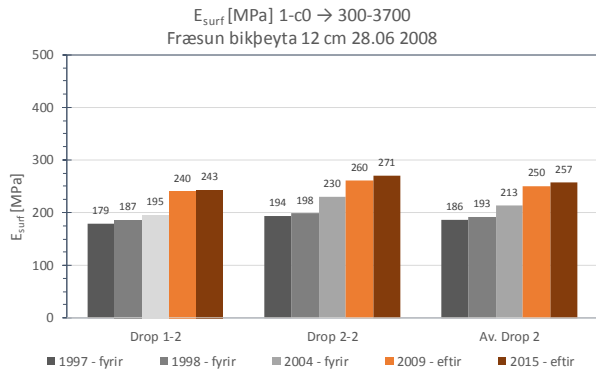
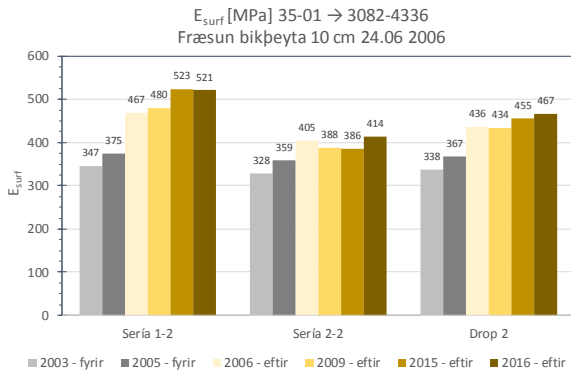
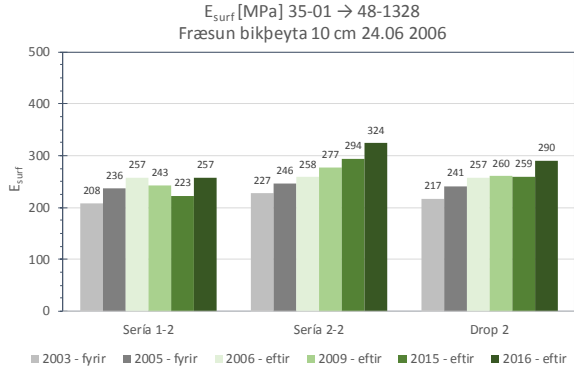
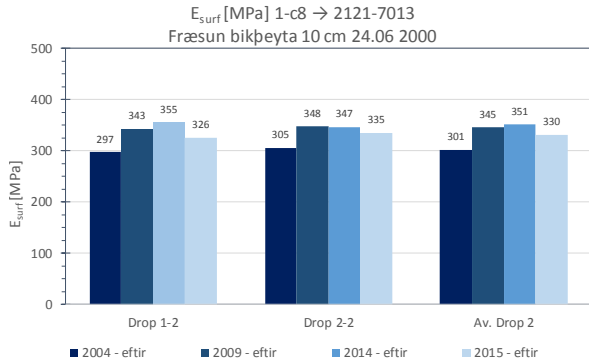
AUPP – sementsfestun

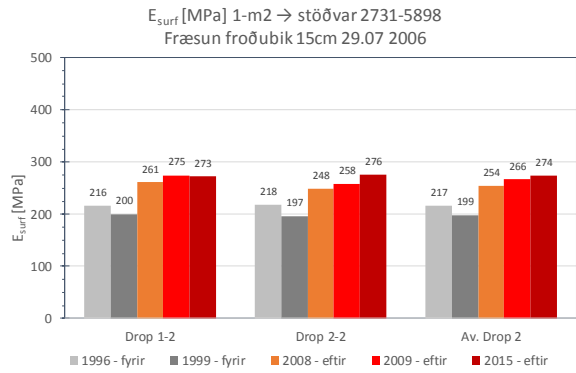
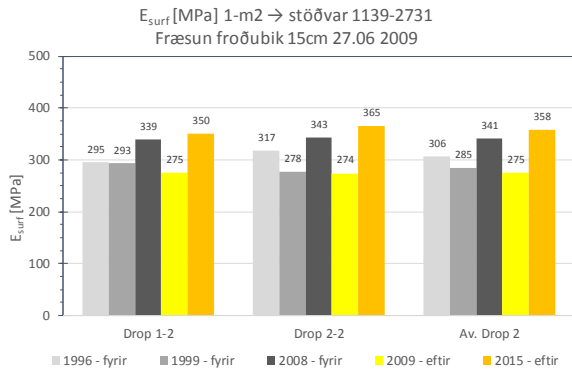
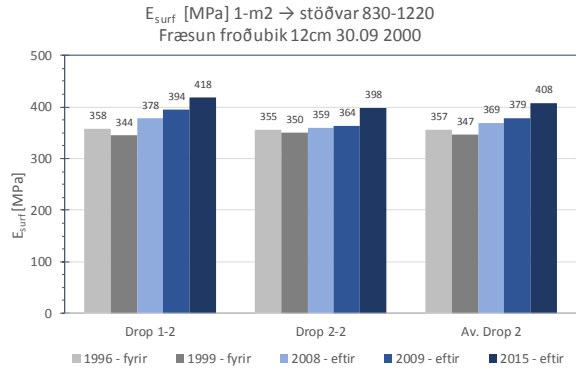
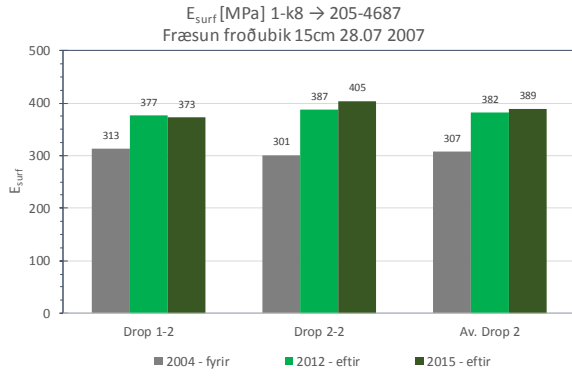




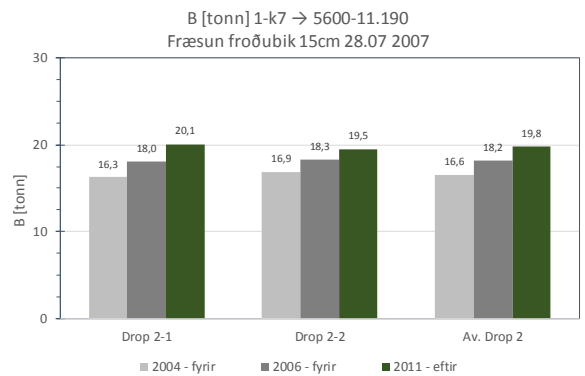
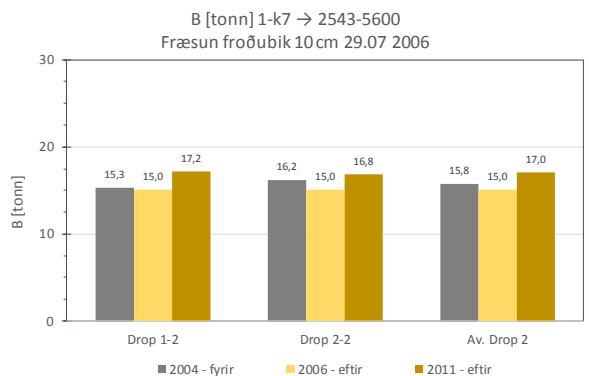
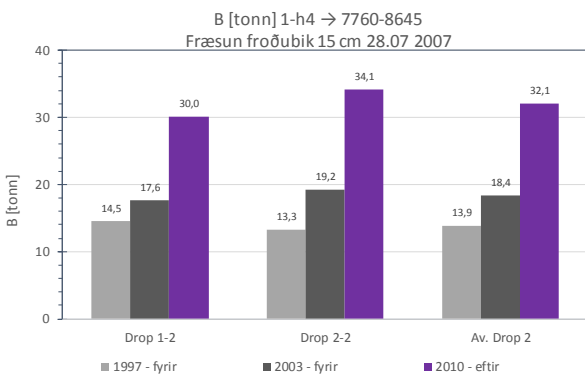
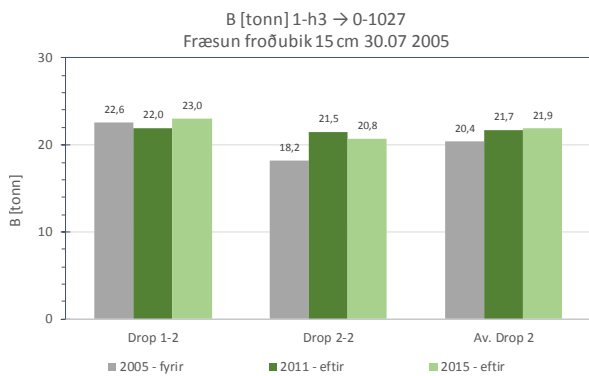
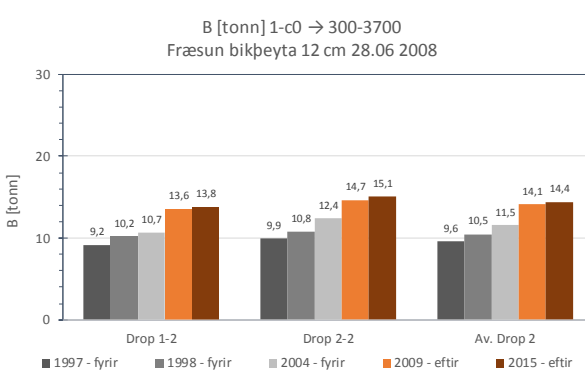
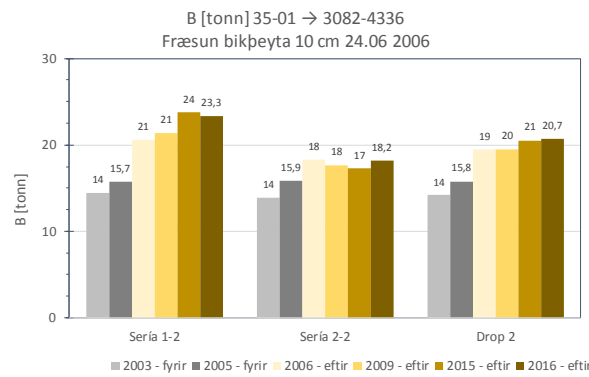
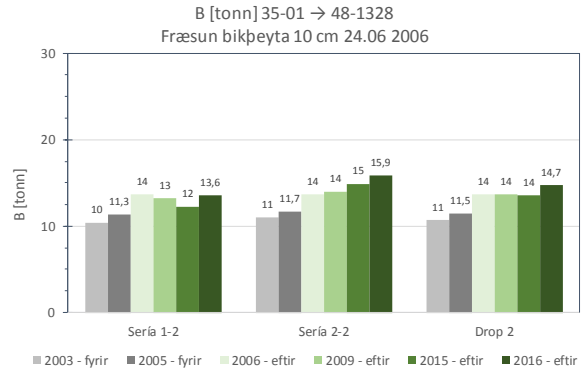
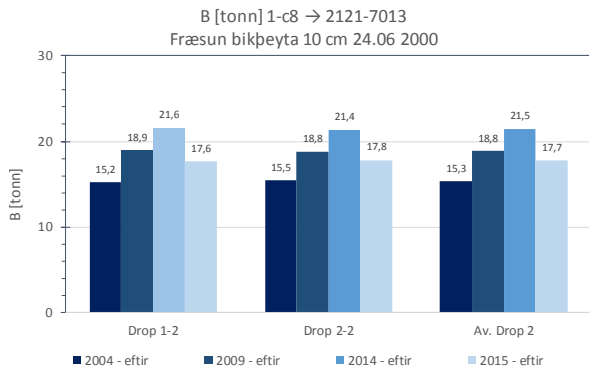
VIÐAUKI B BIKFESTIR VEGIR

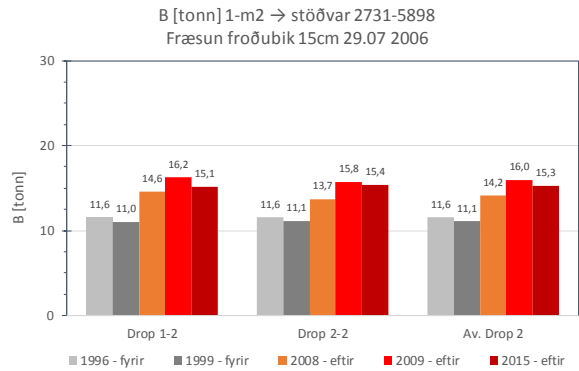
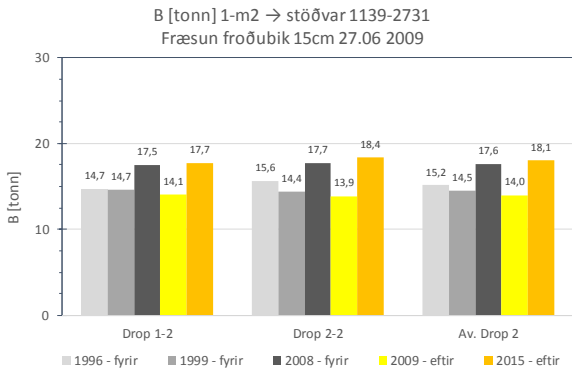
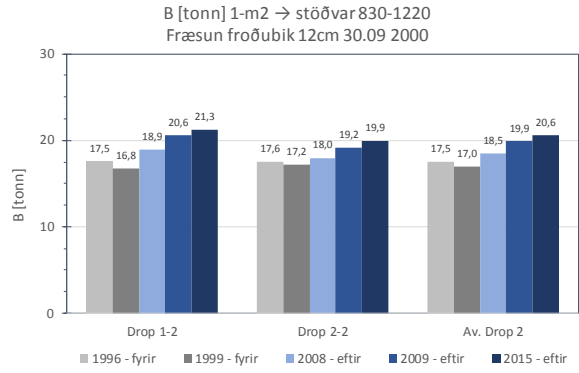
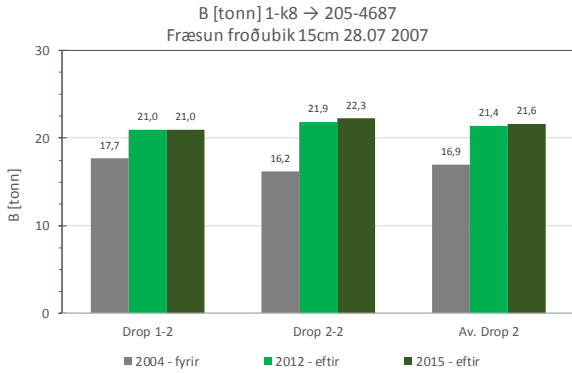
E_{surf} [MPa] – bikfestun



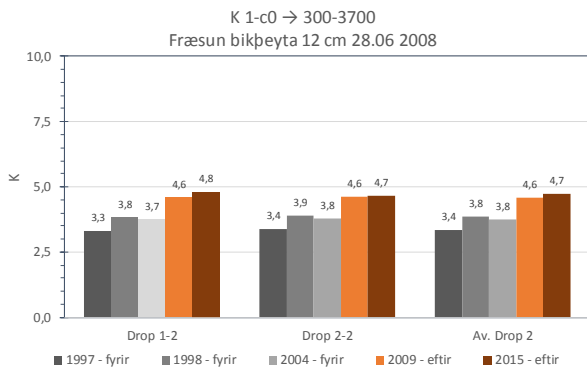
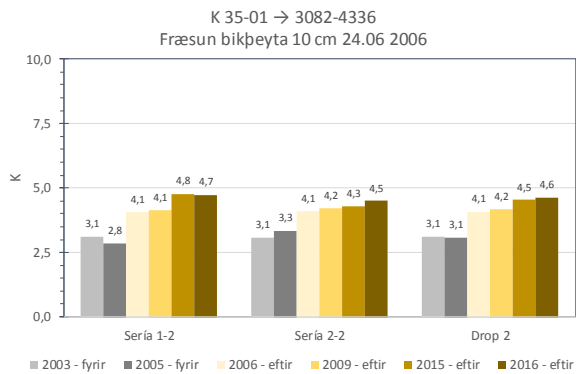
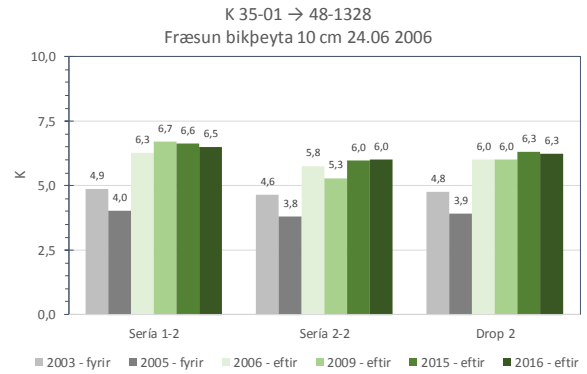
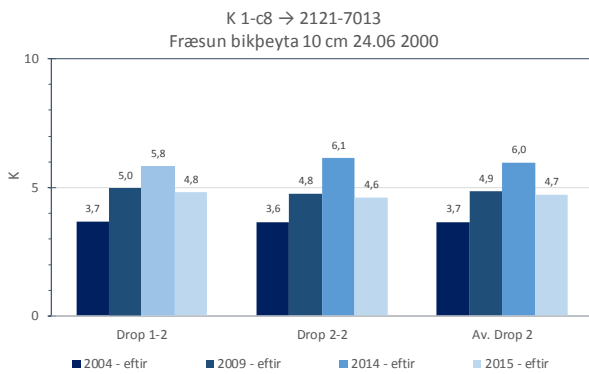


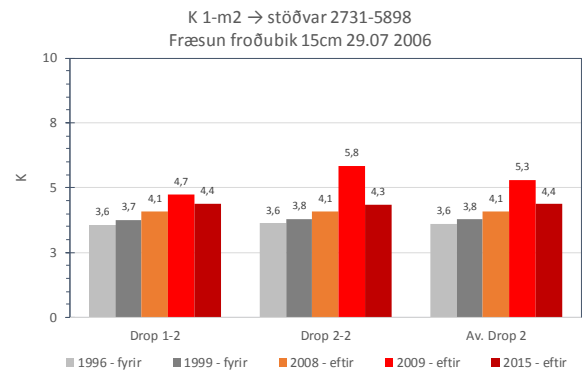
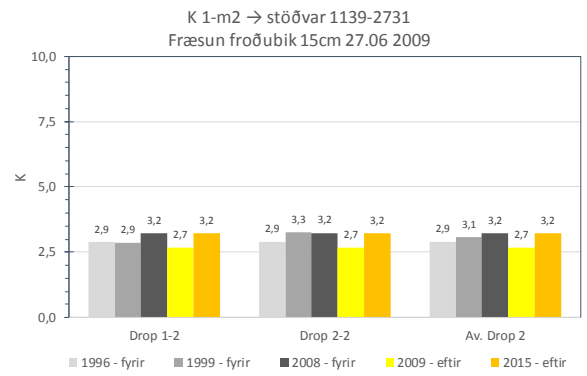
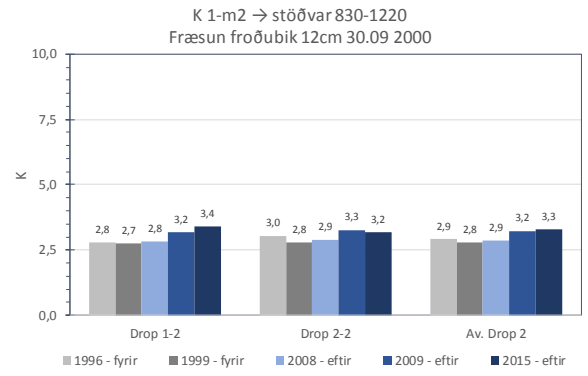
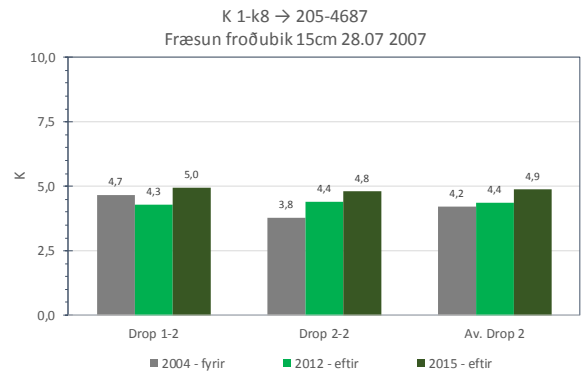
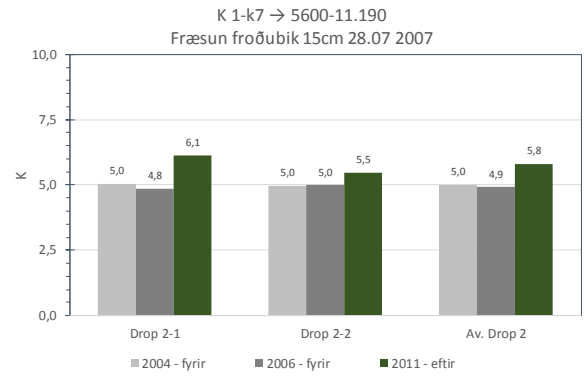
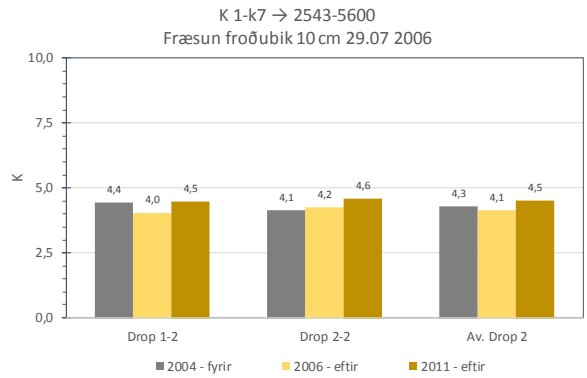
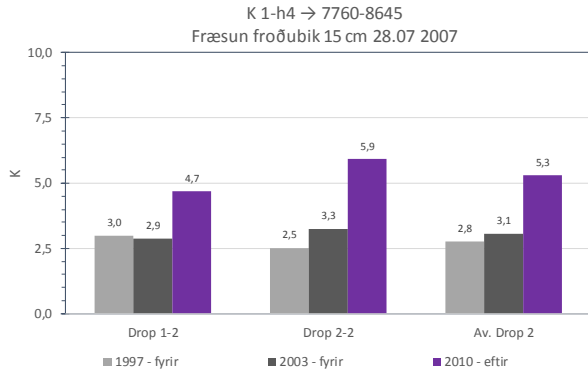
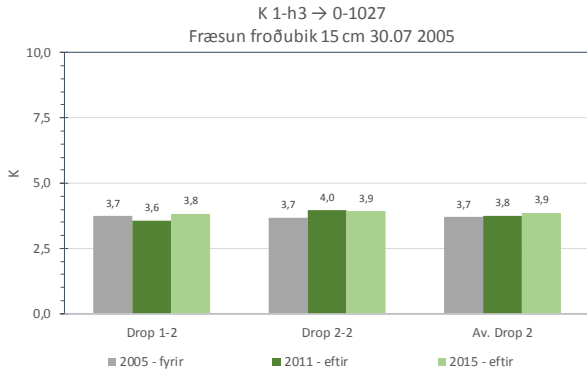
B [tonn] – bikfestun



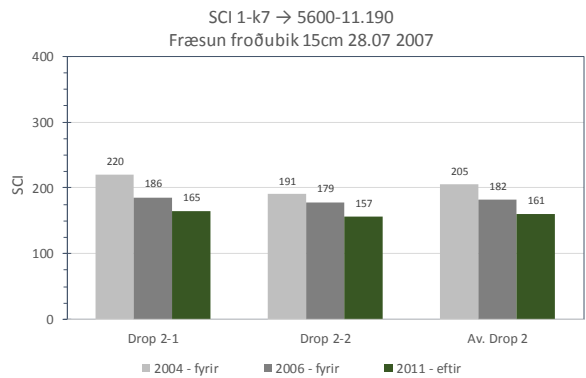
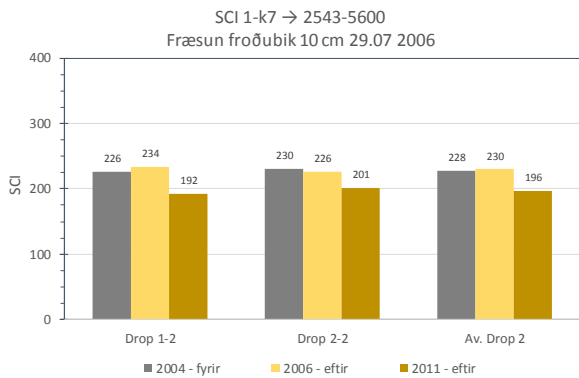
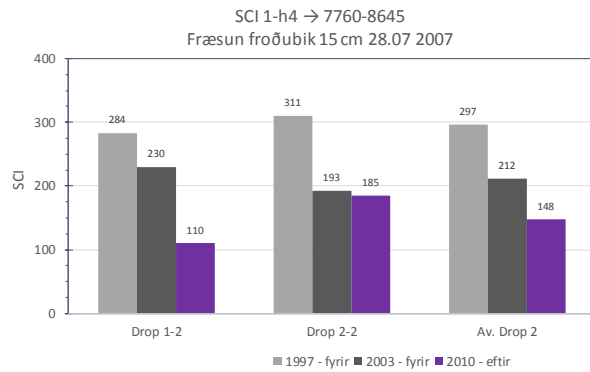
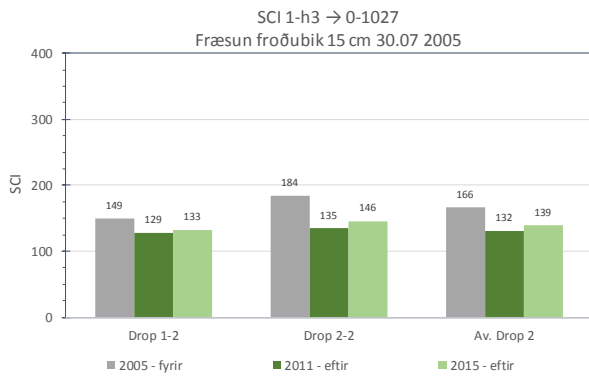
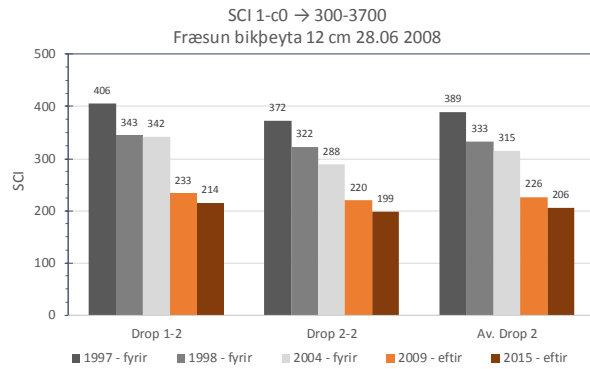
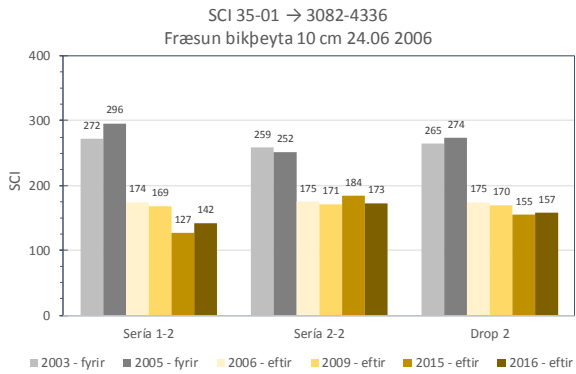
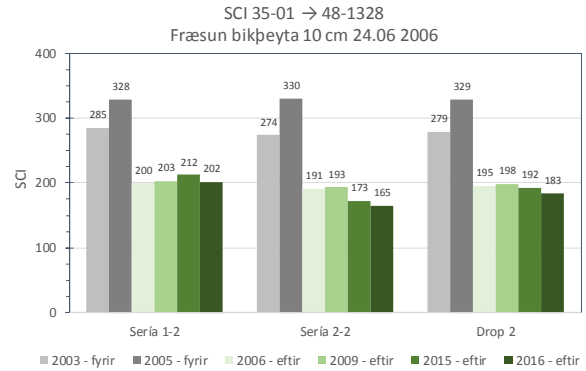
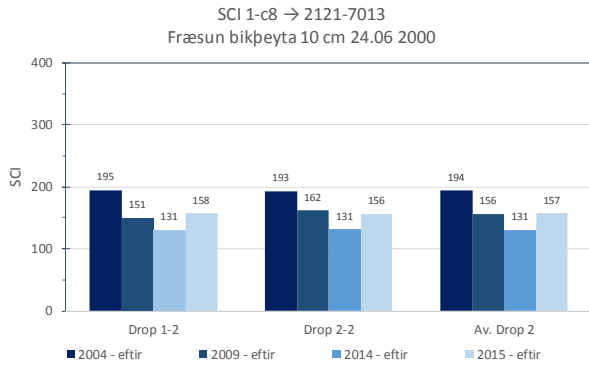


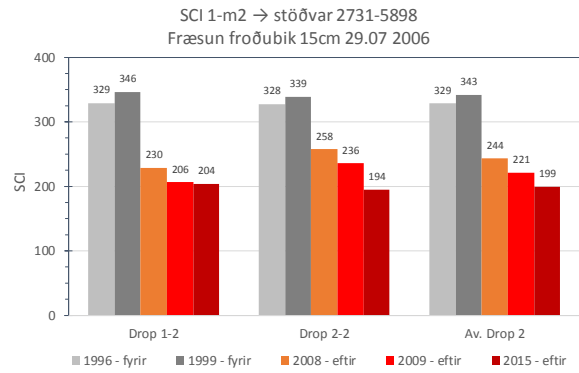
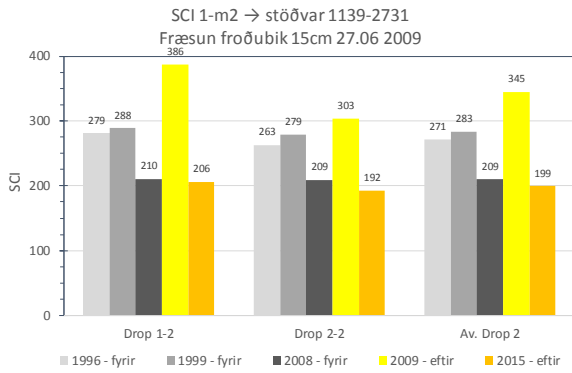
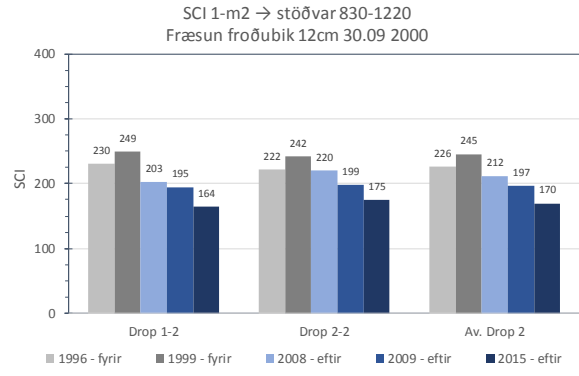
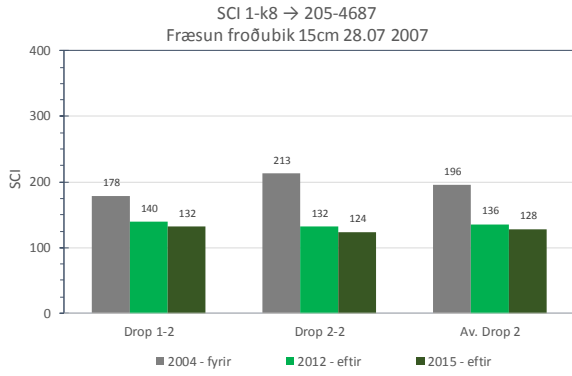
K – bikfestun



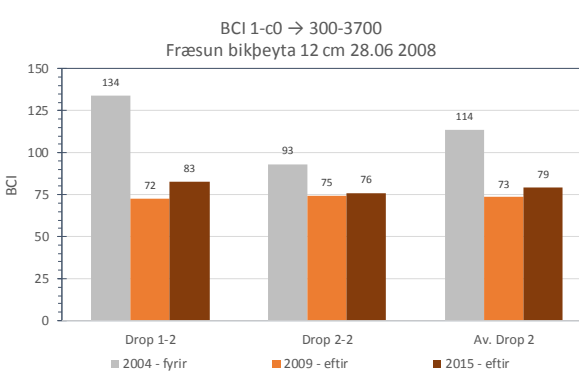
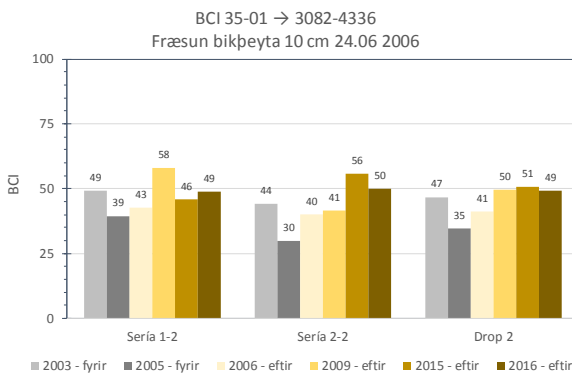
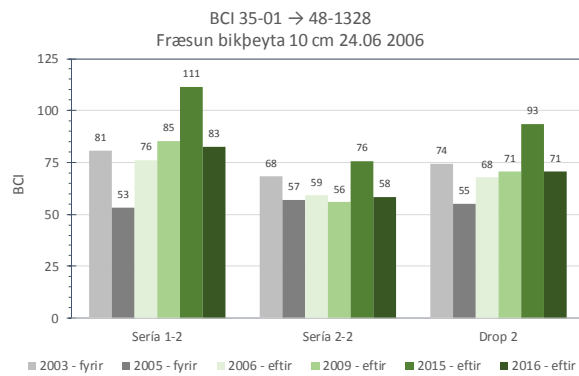
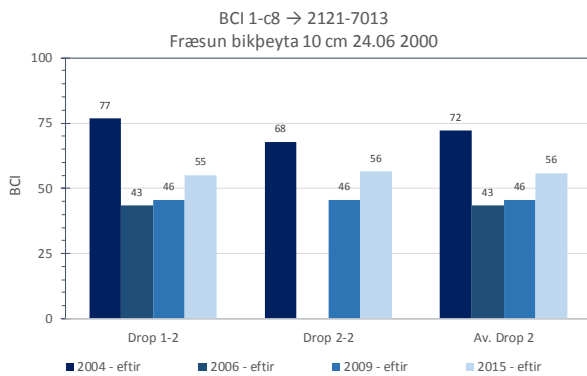


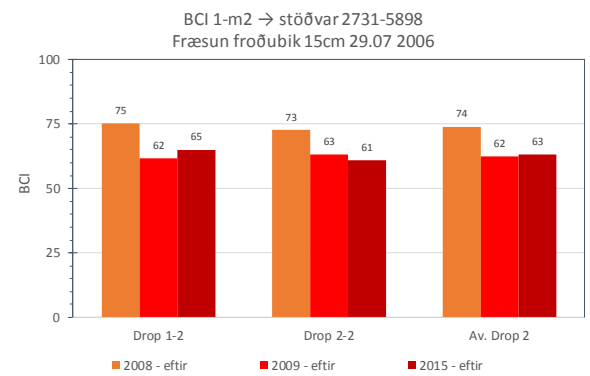
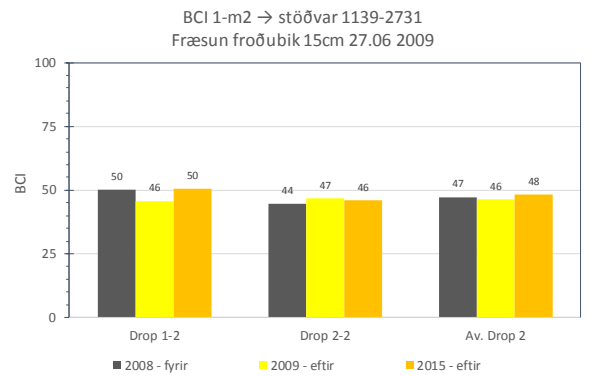
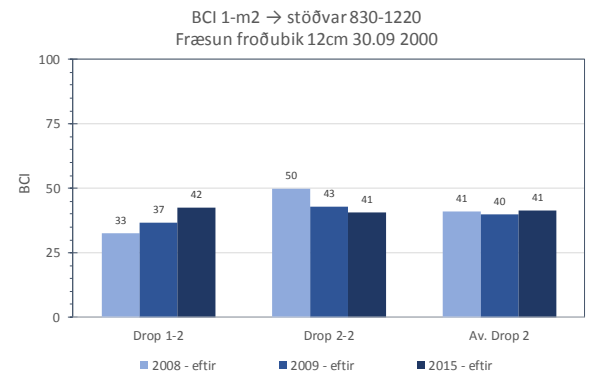
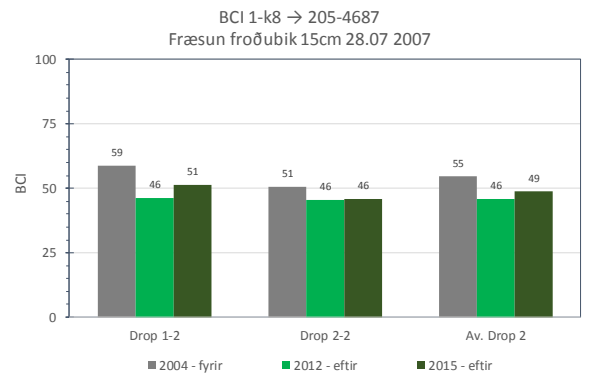
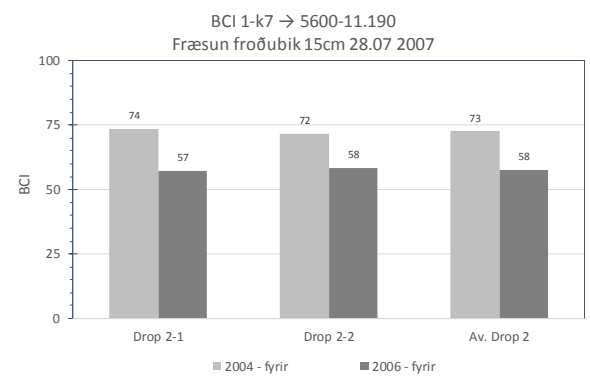
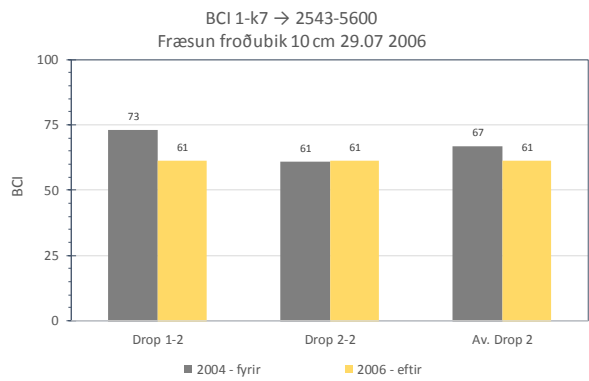
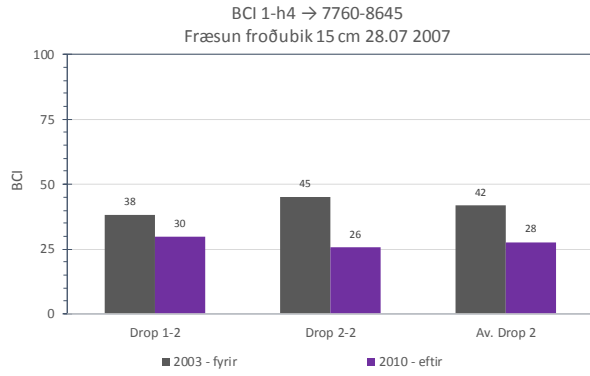
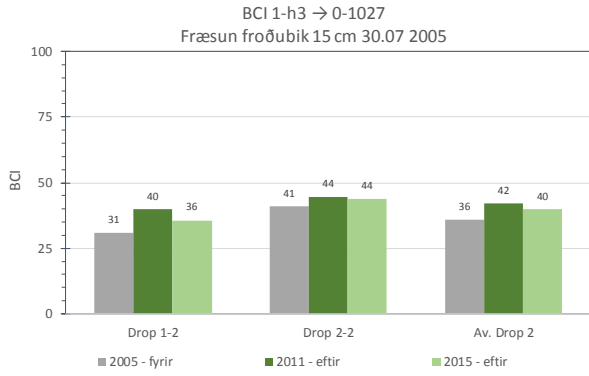
SCI – bikfestun



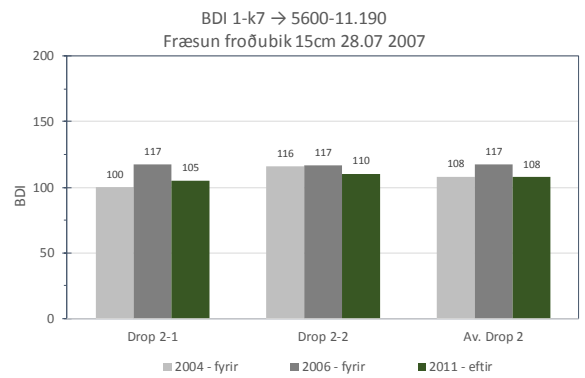
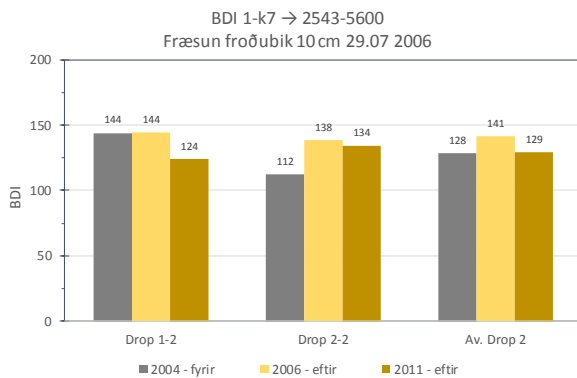
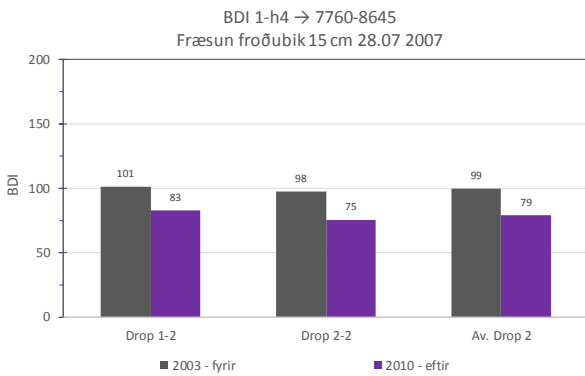
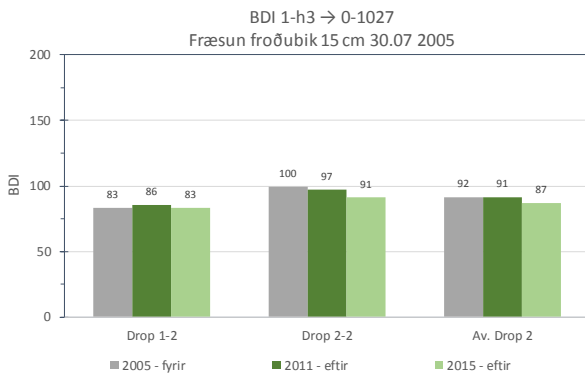
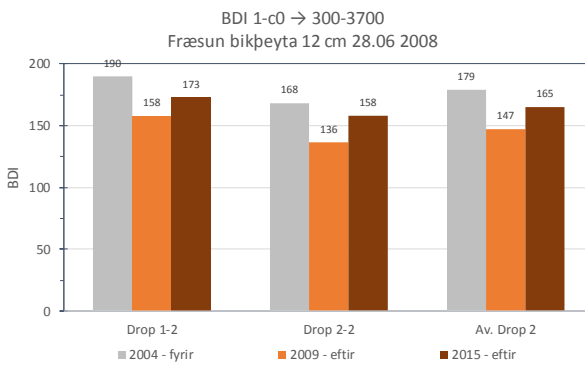
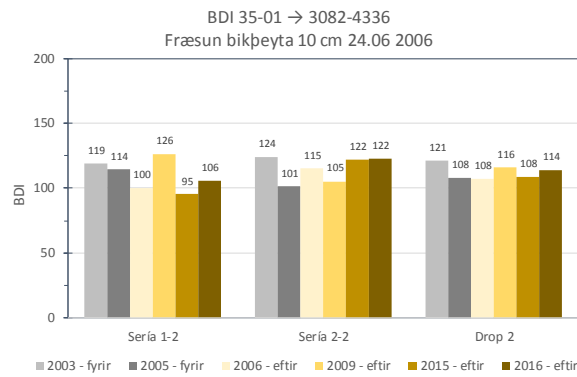
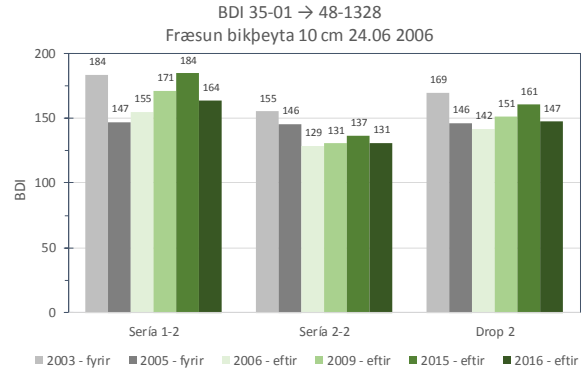
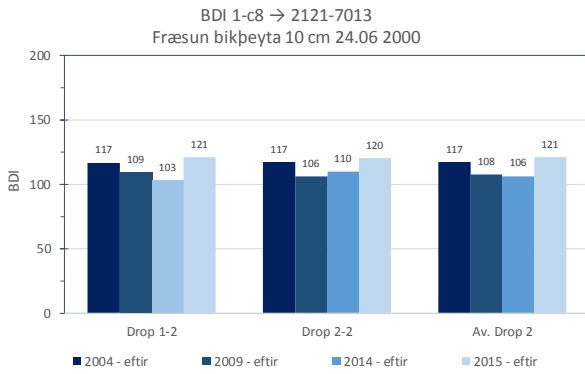


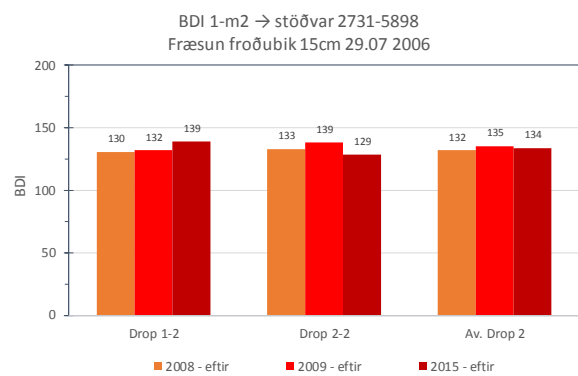
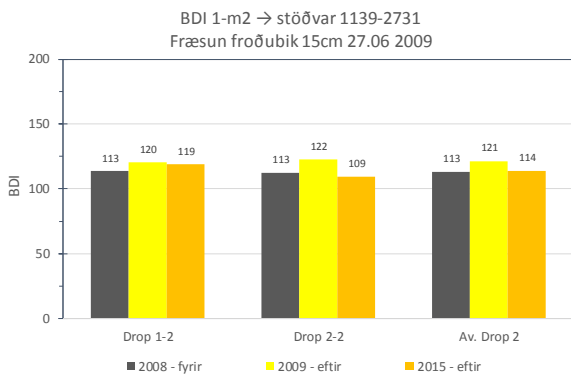
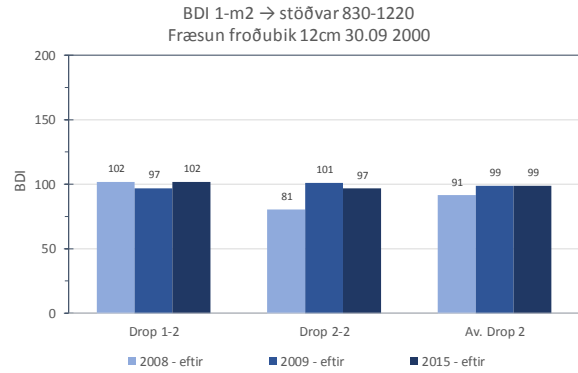
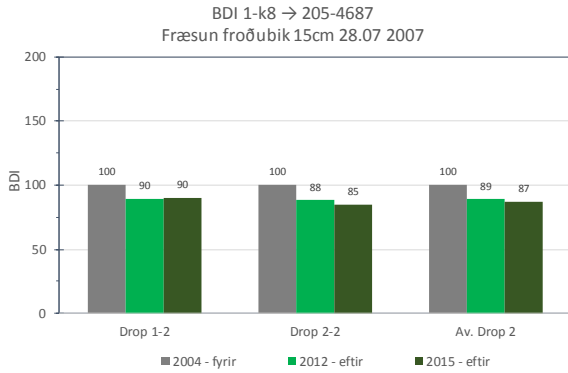
BCI – bikfestun



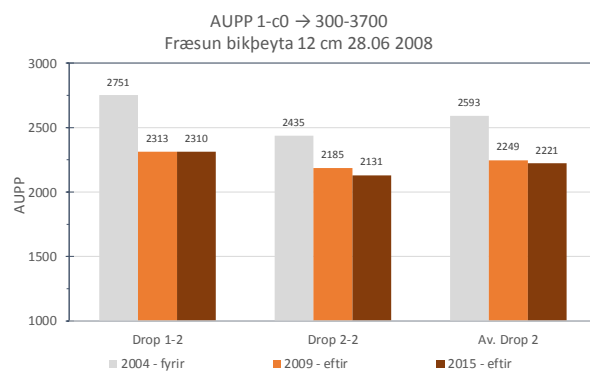
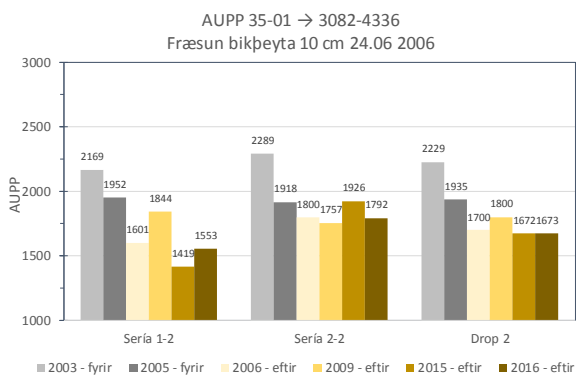
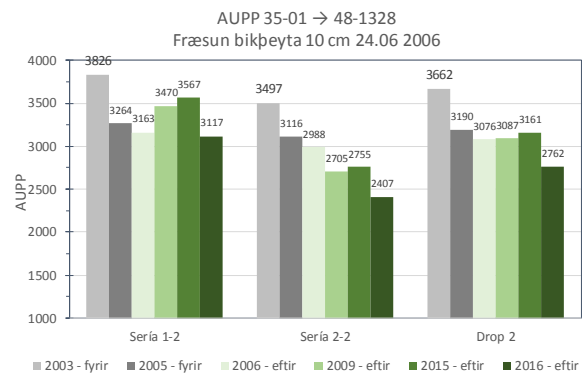
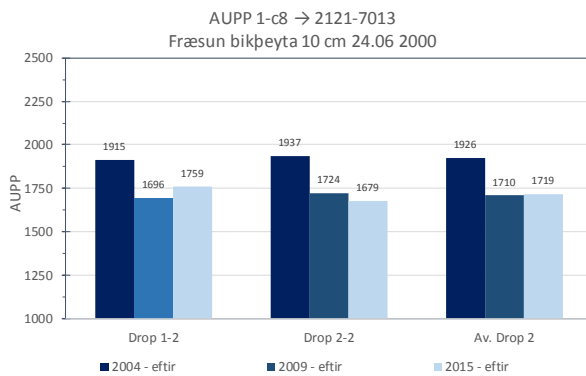


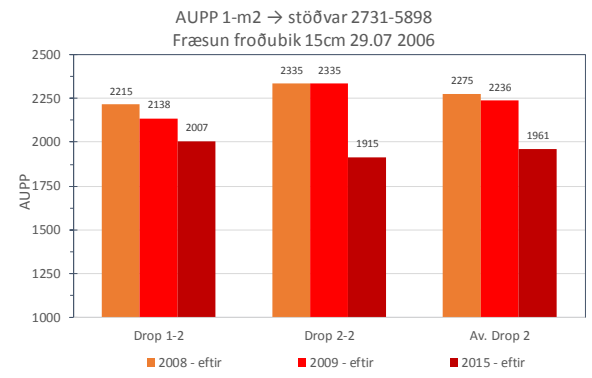
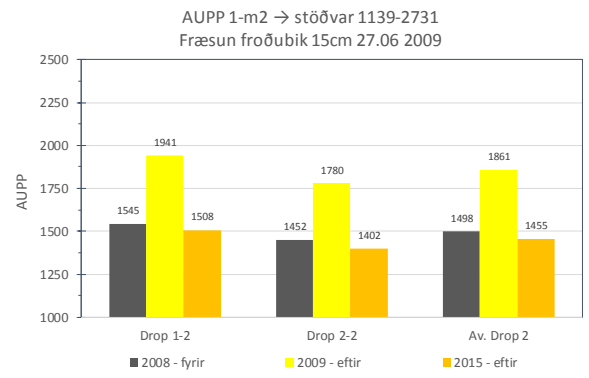
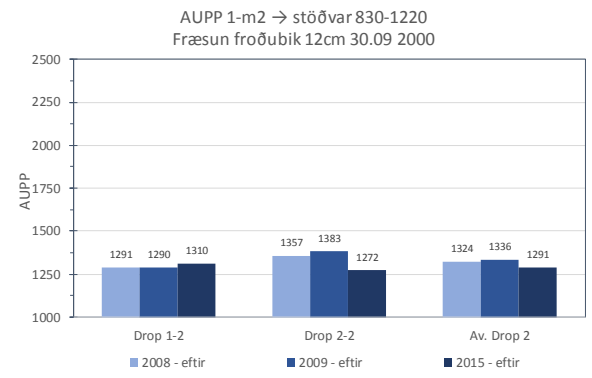
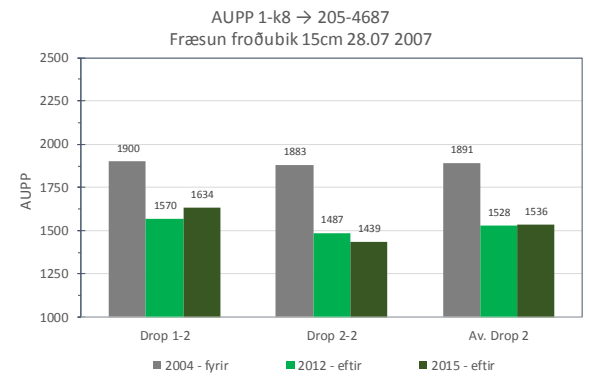
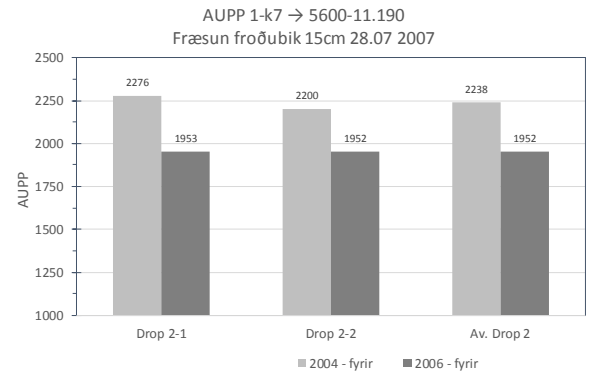
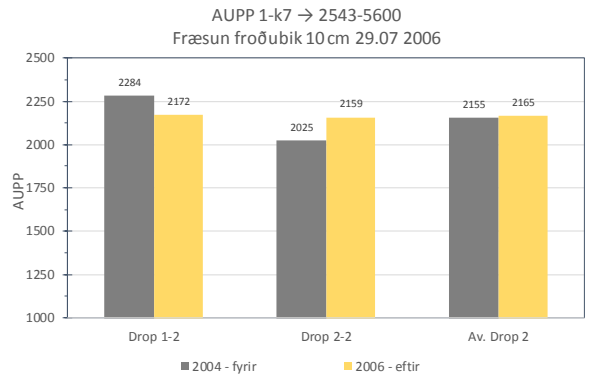
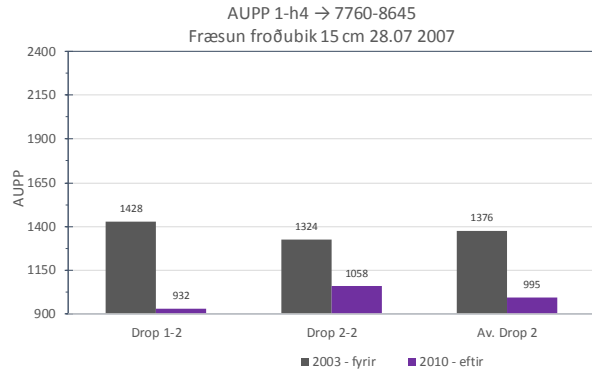
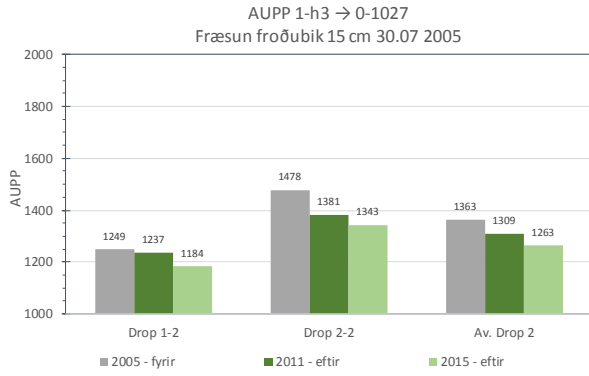
BDI – bikfestun



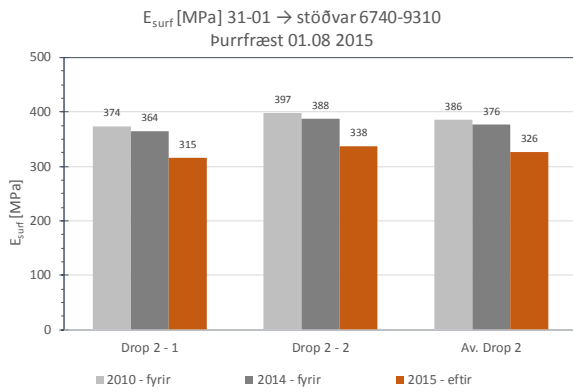
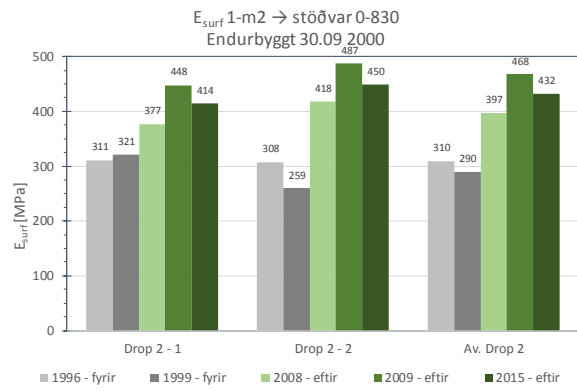
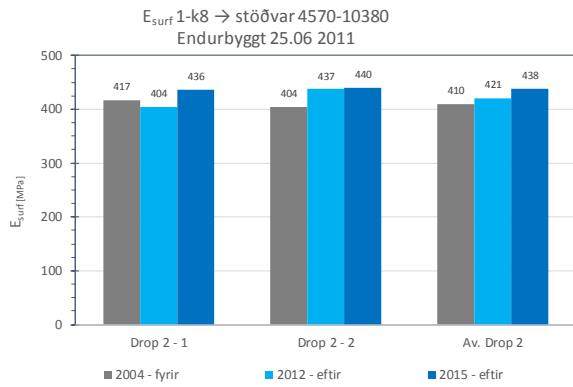


AUPP – bikfestun

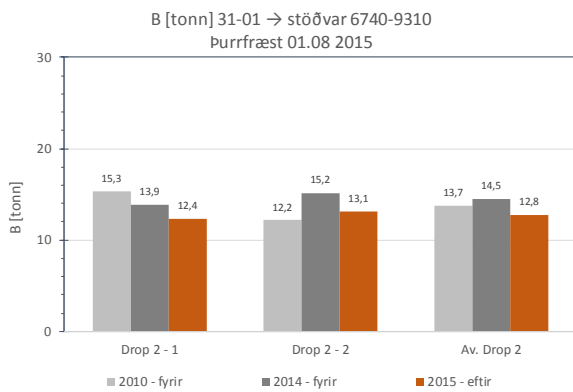
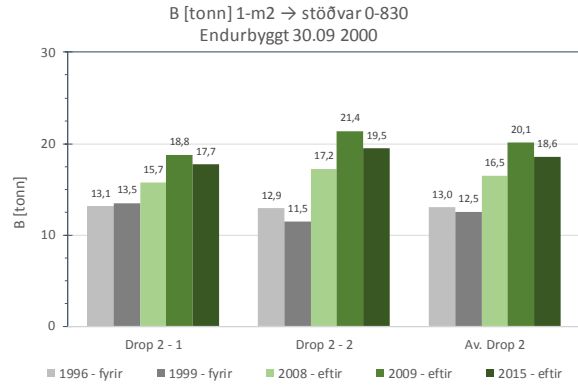
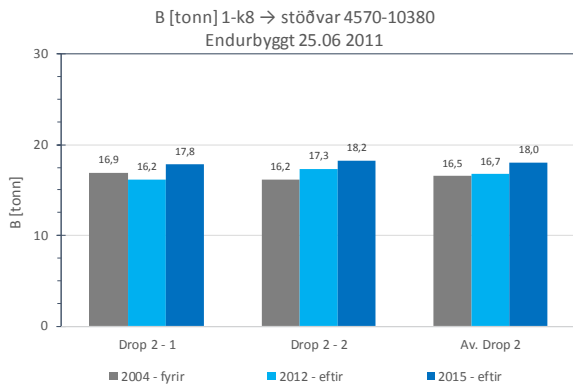




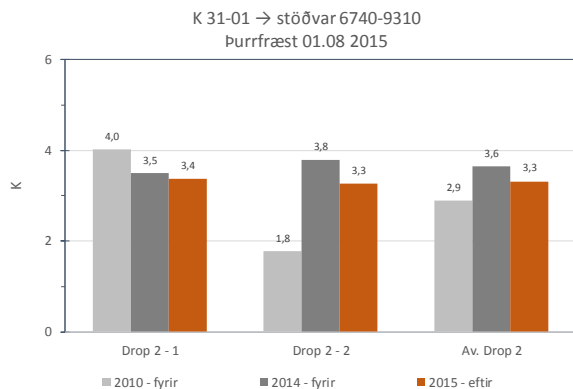
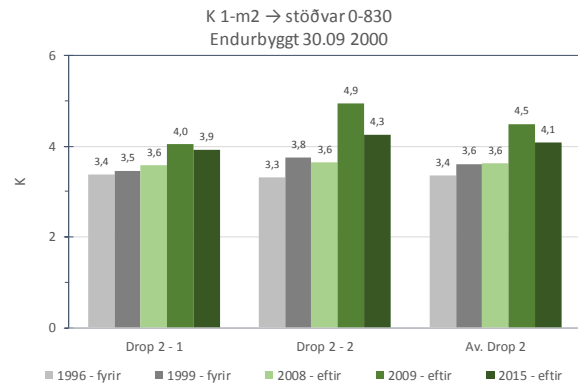
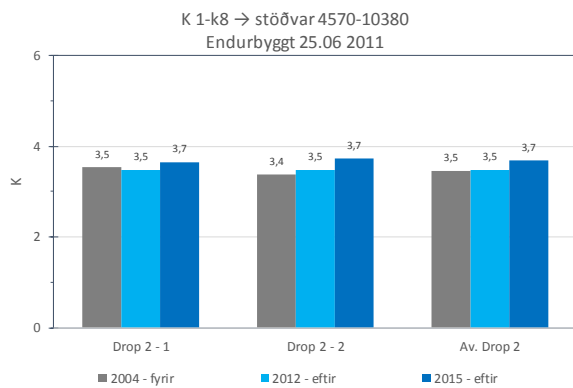
E_{surf} [MPa] – Óbundið burðarlag



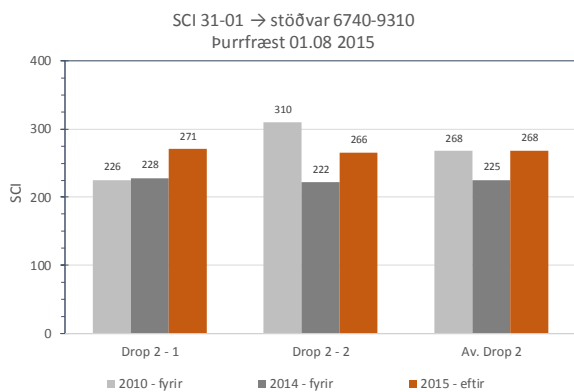
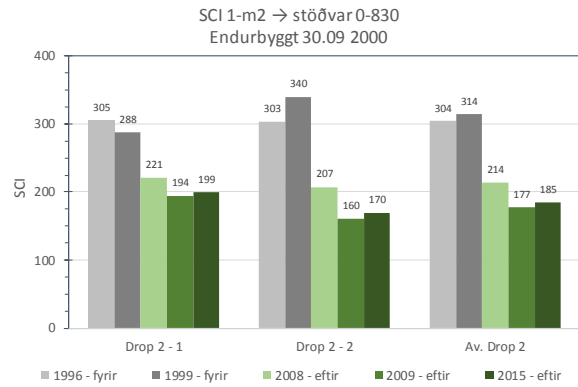
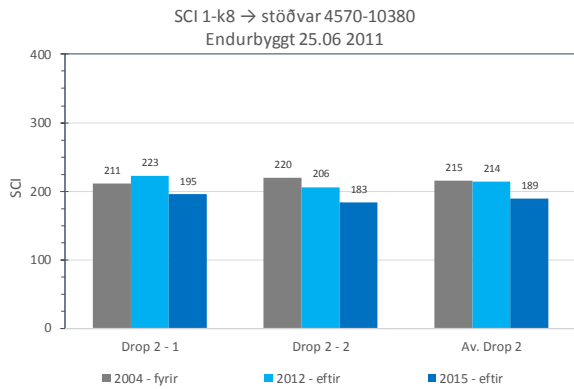
B [tonn] – Óbundið burðarlag



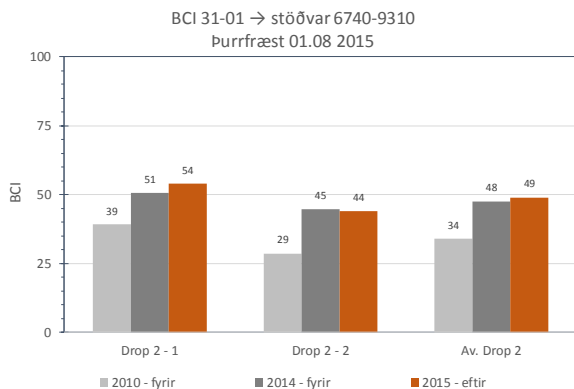
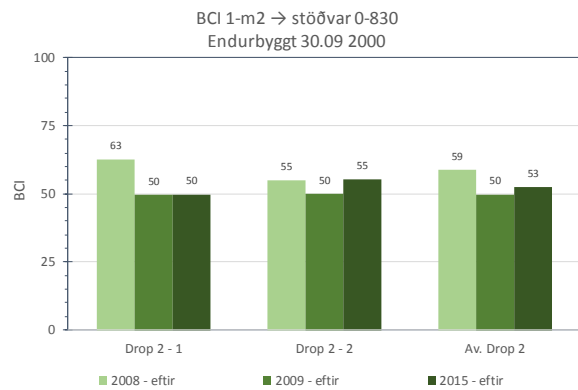
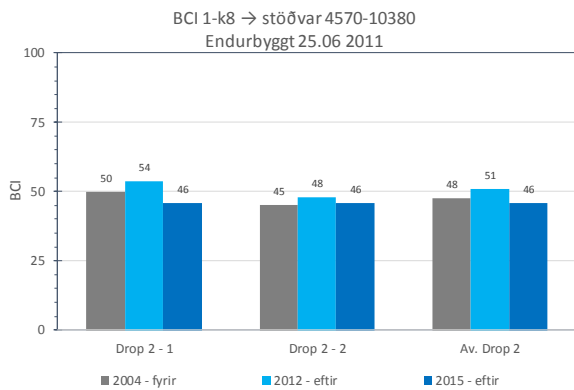
K – Óbundið burðarlag



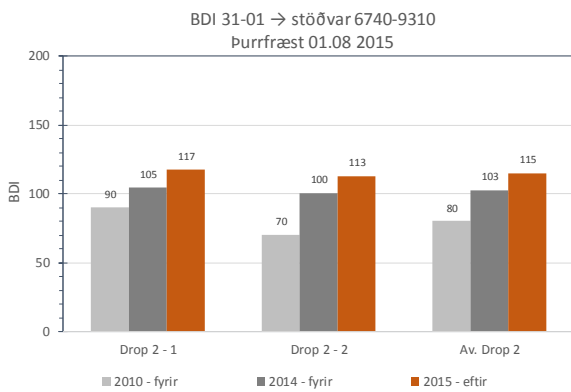
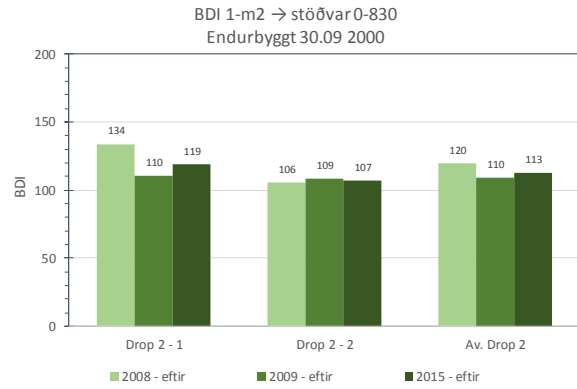
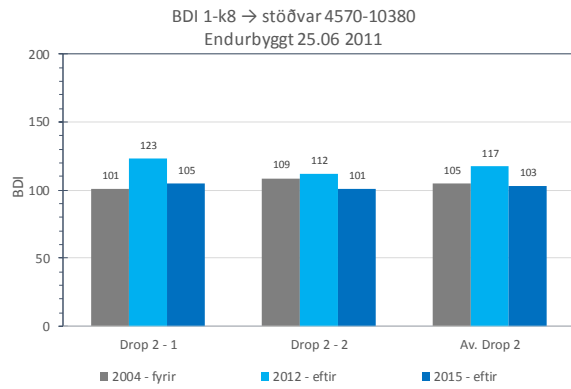
SCI – Óbundið burðarlag



BCI – Óbundið burðarlag



BDI – Óbundið burðarlag



AUPP – Óbundið burðarlag

