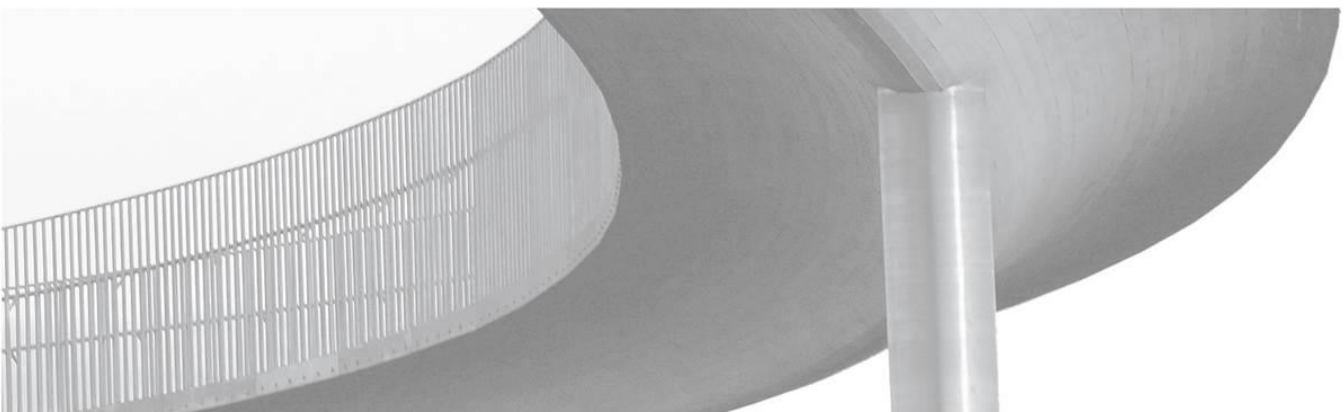


ÞRÓUN Á ENDAFRÁGANGI BRÚA

Þróun á endafrágangi brúarmannvirkja til að lágmarka viðhald vega við brúarenda

30.03.2020



SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

SKJALALYKILL

2970-296-SKY-001-V01

SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

01/53

VERKEFNISSTJÓRI / FULLTRÚI VERKKAUPA

Guðmundur Valur Guðmundsson

VERKEFNISSTJÓRI EFLA

Magnús Arason

LYKILORÐ

Vegir, brýr, viðhald, LCC

STAÐA SKÝRSLU

- Drög
- Drög til yfirlstrar
- Lokið

DREIFING

- Opin
- Dreifing með leyfi verkkaupa
- Trúnaðarmál

TITILL SKÝRSLU

Þróun á endafrágangi brúa

VERKHEITI

Þróun á endafrágangi brúarmannvirkja til að lágmarka viðhald vegna við brúarenda

VERKKAUPI

Vegagerðin

HÖFUNDUR

Ingvar Hjartarson

ÚTDRÁTTUR

Samfelldar og hlutasamfelldar brýr hafa orðið vinsælli undanfarin ár vegna kostnaðarsamra og viðhaldsfrakra þensluraufa í hefðbundnum brúm [1]. Samfelldar eða hlutasamfelldar brýr eru þó ekki lausar við vandamál vegna lengdabreytinga brúargólfsins heldur hafa vandamálin aðeins breyst yfir í vandamál á milli samspils burðarvirkis og jarðvegs í stað staðbundinna vandamála þensluraufa [2].

Á Íslandi hafa samfelldir brúarendar verið notaðir fyrir lengri brýr heldur en er algengt á nágrannalöndunum [3]. Gylfi og Helgi [3] rannsökuðu skemmdir á vegyfirborði við langar samfelldar brýr á Íslandi (heildarlengd > 100 m) og komust að því að íslenskar brýr eru ekki undanskildar jarðvegsburðavirkis vandamálum samfelldra brúa og þeir gátu ekki réttlætt smíði lengri samfelldra brúa á Íslandi heldur en í nágrannalöndunum.

Í þessari rannsókn er byrjað á að skoða erlendar rannsóknir á því hvað orsaki skemmdir vegyfirborðsins við brúarenda samfelldra brúa. Misjafnt er hvað sé talið helsta orsökina en hitaþenslur brúargólfsins, stigvaxandi jarðþrýstingur (e. ratcheting) og veðrunarvandamál eru meðal algengustu orsakanna.

Í framhaldinu eru erlendar rannsóknir á hvernig megi koma í veg fyrir skemmdir vegyfirborðs við brúarenda samfelldra brúa og reynsla EFLU af hvernig megi minnka viðhaldsþörf samfelldra brúarenda skoðað og hvað íslenskir og erlendir staðlar og reglugerðir segja um til um hönnun brúarenda samfelldra brúa. Niðurstöður samantektarinnar benda til þess að minnka megi viðhaldsþörf samfelldra brúarenda með þremur megin aðferðum; a) auka gæðakröfur til fyllingarinnar og styrkja fyllinguna gagnvart sigi, b) nota dempanði efni við endastöpla eins og frauðplast og c) með bættri hönnun sigplötunnar og betri vatnsvörn.

Út frá niðurstöðum samantektarinnar er endurbætt almennt deili á frágangi brúarenda samfelldra brúa kynnt og ráðleggingar varðandi hvað þurfi að hafa í huga við hönnun á frágangi brúarenda samfelldra brúa.

ÚTGÁFUSAGA

<u>NR.</u>	<u>HÖFUNDUR</u>	<u>DAGS.</u>	<u>RÝNT</u>	<u>DAGS.</u>	<u>SAMÞYKKT</u>	<u>DAGS.</u>
01	Ingvar Hjartarson	24.03.20	Baldvin Einarsson	25.03.20	Magnús Arason	31.03.20
Uppsetning skýrslu, heimildarvinna og reynsla frá Skaudalbrú						

SAMANTEKT

Samfelldar og hlutasamfelldar brýr hafa orðið vinsælli undanfarin ár vegna kostnaðarsamra og viðhaldsfrekra þensluraufa í hefðbundnum brúm [1]. Samfelldar eða hlutasamfelldar brýr eru þó ekki lausar við vandamál vegna lengdabreytinga brúargólfsins heldur hafa vandamálin aðeins breyst yfir í vandamál á milli samspils burðarvirkis og jarðvegs í stað staðbundinna vandamála þensluraufa [2].

Á Íslandi hafa samfelldir brúarendar verið notaðir fyrir lengri brýr heldur en er algengt á nágrannalöndunum [3]. Gylfi og Helgi [3] rannsökuðu skemmdir á vegyfirborði við langar samfelldar brýr á Íslandi (heildarlengd > 100 m) og komust að því að íslenskar brýr eru ekki undanskildar jarðvegsburðavirkis vandamálum samfelldra brúa og þeir gátu ekki réttlætt smíði lengri samfelldra brúa á Íslandi heldur en í nágrannalöndunum.

Í þessari rannsókn er byrjað á að skoða erlendar rannsóknir á því hvað orsaki skemmdir vegyfirborðsins við brúarenda samfelldra brúa. Misjafnt er hvað sé talið helsta orsökina en hitaþenslur brúargólfsins, stigvaxandi jarðþrýstingur (e. ratcheting) og veðrunarvandamál eru meðal algengustu orsakanna.

Í framhaldinu eru erlendar rannsóknir á hvernig megi koma í veg fyrir skemmdir vegyfirborðs við brúarenda samfelldra brúa og reynsla EFLU af hvernig megi minnka viðhaldspörf samfelldra brúarenda skoðað og hvað íslenskir og erlendir staðlar og reglugerðir segja um til um hönnun brúarenda samfelldra brúa. Niðurstöður samantektarinnar benda til þess að minnka megi viðhaldspörf samfelldra brúarenda með þremur megin aðferðum; a) auka gæðakröfur til fyllingarinnar og styrkja fyllinguna gagnvart sigi, b) nota dempanði efni við endastöpla eins og frauðplast og c) með bættri hönnun sigplötunnar og betri vatnsvörn.

Út frá niðurstöðum samantektarinnar er endurbætt almennt deili á frágangi brúarenda samfelldra brúa kynnt og ráðleggingar varðandi hvað þurfi að hafa í huga við hönnun á frágangi brúarenda samfelldra brúa.

EFNISYFIRLIT

SAMANTEKT	5
1 INNGANGUR	10
2 MISMUNANDI FRÁGANGUR BRÚARENDA	12
3 ÁSKORANIR Í HÖNNUN SAMFELLDRA BRÚA	15
3.1.1 Láréttar hreyfingar endastöpla og mismunasig jarðvegs	16
3.1.2 Tæringar og veðrunarvandamál	18
3.1.3 Jarðþrýstingur	19
3.1.4 Samantekt	23
4 ERLENDAR RANNSÓKNIR Á SAMFELLDUM BRÚM	24
4.1.1 Gæðakröfur bakfyllingar	24
4.1.2 Notkun frauðplasts bakvið endastöpla	25
4.1.3 Hönnun og frágangur sigplötunnar	28
4.1.4 Samantekt	32
5 STAÐLAR OG REGLUGERÐIR	33
5.1.1 Íslenskir staðlar og reglugerðir	33
5.1.2 Norskir staðlar og reglugerðir	35
5.1.3 Svissneskir staðlar og reglugerðir	37
5.1.4 Breskur hönnunarstaðall	39
5.1.5 Bandarískar leiðbeiningar	39
5.1.6 Samantekt	41
6 SKAUDAL BRÚ Í NOREGI	42
7 BÆTTUR FRÁGANGUR BRÚARENDA FYRIR SAMFELLDAR BRÝR	47
8 LOKAORÐ	49
9 HEIMILDASKRÁ	51

MYNDASKRÁ

MYND 1	Útfærslur endafrágangs á brúm, efst er frágangur á samfelldum brúm, í miðjunni er frágangur á hlutasamfelldum brúm og neðst er fyrir brýr með þenslurauf [1]. _____	12
MYND 2	Dæmi frá Vegagerðinni [5] um frágang brúarenda til að uppfylla aðgengi að legu utan frá og frá rými undir þenslurauf _____	13
MYND 3	Kröfur Vegagerðarinnar [5] um aðgengi að legum í hlutasamfelldum brúm. _____	13
MYND 4	Hreyfing endastöpla brúa vegna hitabreytinga og myndun holrýmis vegna hreyfinganna [8] _____	15
MYND 5	Orsakir skemmda á yfirborði slitlags við samfelldar brýr eru margvíslegar [9] _____	16
MYND 6	Vegna lotubundna hreyfinga brúargólfsins vegna hitabreytinga og skriðs og rýrnunar steypu myndast holrúm við endastöpla [6]. _____	17
MYND 7	Sig og svignun sigplötunnar vegna mismunansigs á milli vegfyllingar og endastöpla ásamt holrýmismyndun undir sigplötunni vegna láréttra hreyfinga endastöpla [11]. _____	18
MYND 8	Kornastærðardreifingar sem veðrast mikið og ætti að forðast að nota í fyllingar við endastöpla [8]. _____	19
MYND 9	Dreifing á jarðþrýstingi eftir hæð endastöpla fyrir mismunandi færslur endastöpla [16]. _____	21
MYND 10	Láréttur jarðþrýstingur á endastöpla samfelldra brúa vegna lotubundna hitaþensla [6]. _____	22
MYND 11	Frágangur endastöpla með teygjanlegu frauðplasti sem dempara í brú í Virginia [15]. _____	25
MYND 12	Notkun frauðplasts sem dempara fyrir hitaþenslur samfelldra brúa og jarðvegsstyrking gagnvart samdrætti brúargólfsins, einingar í cm [19]. _____	26
MYND 13	Frágangur endastöpla í rannsókn Horvath [6], notkun frauðplasts sem dempara ásamt styrkingu jarðvegs með (a) jarðvegsdúk eða (b) sjálfstætt standandi frauðplastseininga. _____	26
MYND 14	Frágangur við endastöpla með nýtingu frauðplasts (3) og styrkingu jarðvegs (4) [10]. _____	27
MYND 15	Notkun frauðplastseininga í stað fyllingar vega og undirstaðna. Tölurnar tákna þrýstistyrk eininganna í kPa [20]. _____	28
MYND 16	Mismunandi útfærslur frágangs sigplötu við endastöpla. (a) hefbundinn frágangur samkvæmt Graubünden/CH Department of Civil Engineering, (b) samkvæmt Svissneskum reglugerðum og (c) endurbættur frágangur samkvæmt Dreier, Burdet og Muttoni [22]. 1: slitlag; 2 og 3: burðarlög vegbyggingar; 4: undirsteypa; 5: fyrri vatnsvörn; 6: seinni vatnsvörn; 7: biklag (e. bituminous layer); 8: skúfbolti (e. steel stud); 9: frauðplast (e. synthetic foam); 10: tengijárn steypuhluta; 11: slétt biklag (e. sliding bituminous layer). [22] _____	29
MYND 17	Algeng útfærsla á brúarendum samfelldra brúa í Ameríku, sigplatan er lárétt í yfirborðinu og hvílir á endabita brúarinnar öðru megin og steyptri undirstöðu (e. sleeper slab) í hinn endann [23]. _____	30
MYND 18	Útfærsla tengingar á milli sigplötu og endabita í New York fyrir samfelldar og hluta-samfelldar brýr. [24] _____	30
MYND 19	Frágangur endaplötunnar við annan brúarendann í rannsókn Chen og Abu-Farsakh [25]. Stífari platan var 400 mm þykk en aðrir þættir óbreyttir. _____	31
MYND 20	Frágangur forsteypu eininganna við endastöpla brúarinnar í rannsókn Greimann o.fl. [26]. _____	31
MYND 21	Kröfum um hvenær skuli nota samfelldar brýr og hvenær þurfi að reikna færslur brúarenda til að nota samfelldar brýr [5]. _____	34
MYND 22	Kröfur um stærð og staðsetningu sigplötunnar við brúarendann [5]. _____	35
MYND 23	Kröfur norsku vegagerðarinnar um stærð og lögun sigplötunnar fyrir vegbrýr [4]. _____	36
MYND 24	Kröfur norsku vegagerðarinnar um hvernig járnun sigplötunnar og endabitans skuli háttáð. _____	36
MYND 25	Kröfur norsku vegagerðarinnar um hvernig samskeytum sigplötunnar og endabitans skuli háttáð. _____	36
MYND 26	Dæmi um útfærslur á stífum endastöplum fyrir brýr með mikinn krappa, kraftarnir teknir upp í stífu horni eða lokuðum kassa [1]. _____	37

MYND 27 Frágangur sigplötu við endastöpla samfelldra brúa samkvæmt svissneskum stöðlum [1] _____	37
MYND 28 Frágangur sveigjanlegs endastöpluls fyrir hluta-samfelldar brýr [1]. _____	38
MYND 29 Frágangur tengingar á milli sigplötu og brúarenda í New York fylki. Notkun skáhallandi króks á milli endastöpla og sigplötu er að aukast í vinsældum [26] _____	41
MYND 30 Skaudal brúin í Noregi, horft til norðurs. _____	42
MYND 31 Frágangur brúarenda á Skaudalbrú í Noregi, suðurendi. _____	43
MYND 32 Járnun sigplötunnar, endabitans og samskeytin á milli í Skaudalbrú í Noregi, suðurendi. _____	43
MYND 33 Frágangur brúarenda á Skaudalbrú í Noregi, norðurendi. _____	44
MYND 34 Ástand vegfirborðsins við syðri enda Skaudal brúnnar, mynd tekin í mars 2020. _____	45
MYND 35 Ástand vegfirborðsins við nyrðri enda Skaudal brúnnar, mynd tekin í mars 2020. _____	46
MYND 36 Tillagan að bættum endafrágangi felur í sér 1) tengingu sigplötunnar við brúargólf með ryðfríum járnum, 2) styrkingu malbiks með neti, 3) jarðvegisdúka ofan við sigplötu, 4) fínt fyllingarefni við enda sigplötunnar, 5) frauðplast við endabita brúarinnar og 6) nota lengda sigplötu sem þynnist út frá brúarendanum. Einingar í mm. _____	48

1 INNGANGUR

Brýr án þensluraufa eru yfirleitt fyrsta val í brúm af ákveðinni lengd, til dæmis hér á Íslandi og í Noregi. Á Íslandi hafa verið byggðar lengri brýr án þensluraufa en í nágrannalöndunum [3]. Norska vegagerðin hefur gefið út brúarstaðal (þ.e. Håndbok N400 [4]) sem segir til um hámarkslengdir brúa án þensluraufa. Á Íslandi hafa verið byggðar um 200 m langar brýr án þensluraufa á meðan hámarkslengd brúa við bestu skilyrði í Noregi er ekki ætlað að fara yfir 120 m án þensluraufa. Þetta er eftirtektarverður munur milli landa sem eru bæði staðsett í N-Evrópu.

Gylfi Sigurðsson og Helgi S. Ólafsson [3] rannsökuðu ástand þriggja langra brúa með kröfur norska staðalsins til hliðsjónar. Spurning sem rannsókn þeirra leitaðist eftir að svara var hvort að á Íslandi hefðu of langar brýr verið hafðar án þensluraufa. Var kannski eitthvað í aðstæðum hér á Íslandi sem gat réttlætt þessa útfærslu í lengri brúm, svo sem veðurfar, hitastig eða hitasveiflur milli árstíða sem gæti leyft þennan mun milli Íslands og Noregs. Til að svara þessari rannsóknarspurningu voru þrjár brýr sem voru byggðar eftir árið 2000 skoðaðar, brýr yfir Kolgrafarfjörð, Hvítá og Múlakvísl. Niðurstaða þeirra var að yfirlög í aðlægum vegum sýndu ummerki um að þjöppuð fylling væri að síga og að þetta gæti haft áhrif á aksturseiginleika við brýrnar og minnkað öryggi. Ástæður sigs voru kynntar sem og mögulegar mótvægisáðgerðir sem mælt var með:

- Setja þenslurauf og þar með lágmarka áhrifin og/eða skemmdirnar vegna formbreytinga og áraunar í vegfyllingu.
- Betrumbæta hönnun sigplatna. Hanna þær í stærðum í samræmi við lengd brúarinnar.
- Reglubundnar viðgerðir.

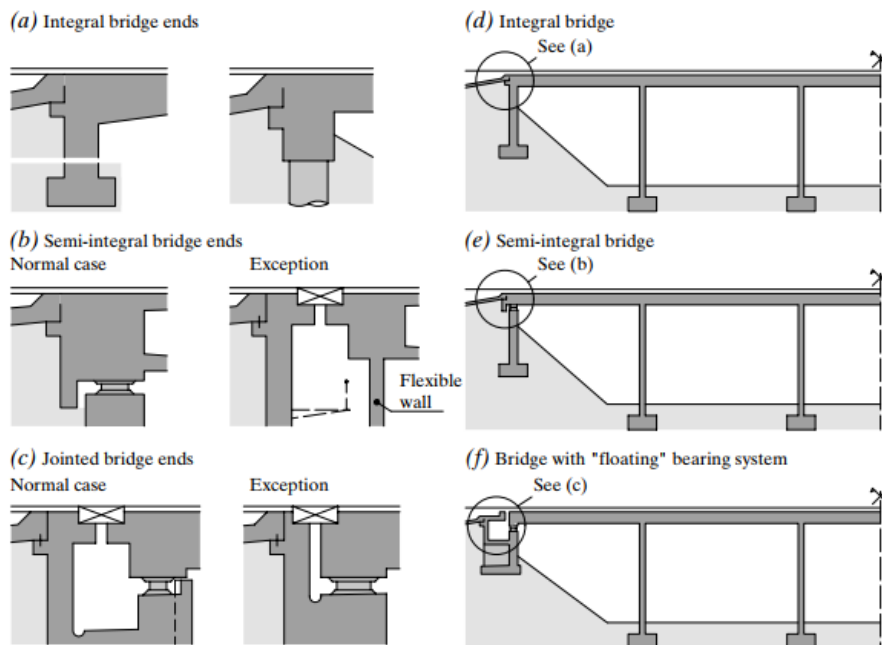
Það eru ýmsum spurningum ósvarað eins og Gylfi Sigurðsson og Helgi S. Ólafsson [3] réttilega bentu á. Þeir sýndu fram á að brýr án þensluraufa eru ekki undanskildar vandamálum sem kunna að rísa vegna samspils burðarvirkis og jarðvegs (e. soil-structure interaction), þ.e. samspil á milli endabita brúa og vegfyllinga. Algengasta sjáanlega dæmið um skemmdir eru stórar og staðbundnar sprungur í slitlaginu við brúarendann.

Í þessu rannsóknarverkefni verða erlendar rannsóknir teknar saman á því hvað veldur vandamálunum við brýr án þensluraufa, hvernig vandamálin hafa verið leyst erlendis og hvað staðlar og reglugerðir ráðleggja að gera til að draga úr vandamálunum. Í framhaldinu er reynsla EFLU af hönnun á

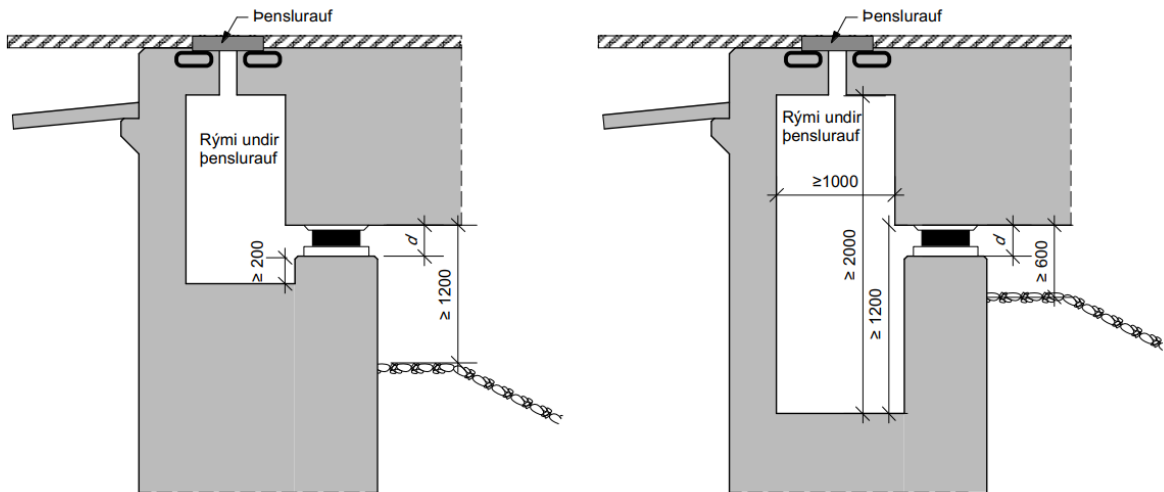
endafrágangi á Skaudalbrúnni í Noregi sem er án þensluraufa kynnt og hvernig frágangurinn reynist. Byggt á þessum forsendum er ráðlagður endurbættur frágangur brúarenda án þensluraufa kynntur.

2 MISMUNANDI FRÁGANGUR BRÚARENDA

Hefðbundnar brýr af ákveðinni lengd hafa þensluraufar við enda brúargólfsins og legur á milli endabita brúargólfsins og endastöpla, brúargólfið er því frjálst að hreyfast við hitabreytingar, sjá neðstu röð á mynd 1. Til að geta skoðað ástand þensluraufanna og leganna og skipt um þær ef þörf er á þarf yfirleitt að byggja rými neðan við þensluraufina til að geta skoðað hana, sjá mynd 2 [5]. Slíkt rými er kostnaðarsamt í smíði og einnig er reglubundið eftirlit og útskipting á þensluraufunum og legunum kostnaðarsamt. Veðrun og tæring eru helstu ástæðurnar fyrir sliti á legum, sérstaklega þar sem sölt eru notuð gegn ísmyndun á vegum [6]. Helstu vandamál þensluraufa orsakast einnig helst af tæringu og sliti vegna umferðarálags. Þensluraufarnar flækja einnig malbikun vegsins þar sem ekki er hægt að malbika yfir þensluraufina sjálfa [7].

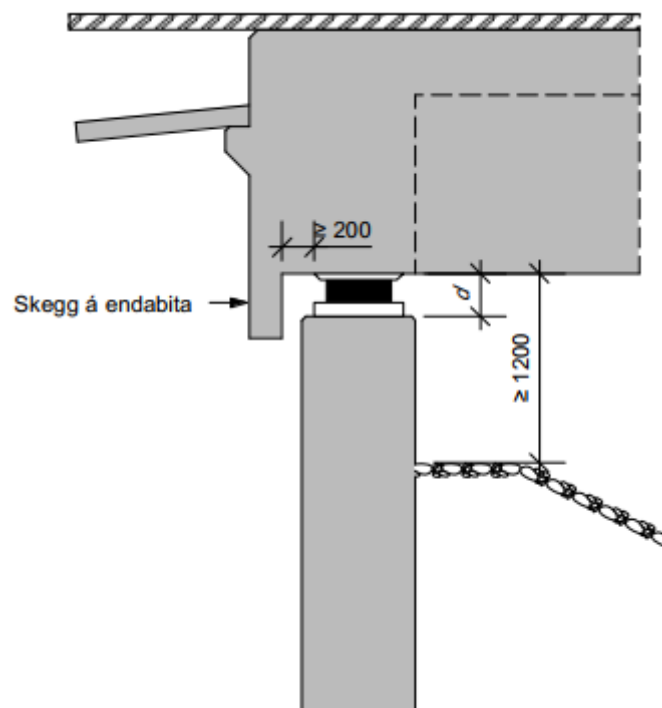


MYND 1 Útfærslur endufrágangs á brúm, efst er frágangur á samfelldum brúm, í miðjunni er frágangur á hlutasamfelldum brúm og neðst er fyrir brýr með þenslurauf [1].



MYND 2 Dæmi frá Vegagerðinni [5] um frágang brúarenda til að uppfylla aðgengi að legu utan frá og frá rými undir penslurauf

Í sumum tilfella er aðeins pensluraufinni sleppt en lega notuð á milli endabita og endastöpla, þær brýr eru yfirleitt kallaðar hluta-samfelldar brýr (e. semi-integral bridges). Í hluta-samfelldum brúm hreyfist yfirbyggingin, þ.e. brúargólfið, endabittinn og siglattan, sem ein heild en hreyfing yfirbyggingarinnar er slitin frá endaveggnum, sjá miðlínuna á mynd 1, [1]. Endaveggurinn færast því ekki með brúargólfinu og þarf því ekki að þola jafn mikið álag og í samfelldum brúm. Einnig endist yfirleitt legan betur heldur en á hefðbundnum brúm þar sem hún er vatnsvarin í hluta-samfelldum brúm og því minna efnaáreiti fyrir leguna. Á mynd 3 má sjá kröfur Vegagerðarinnar um aðgengi að legum fyrir hlutasamfelldar brýr [5].



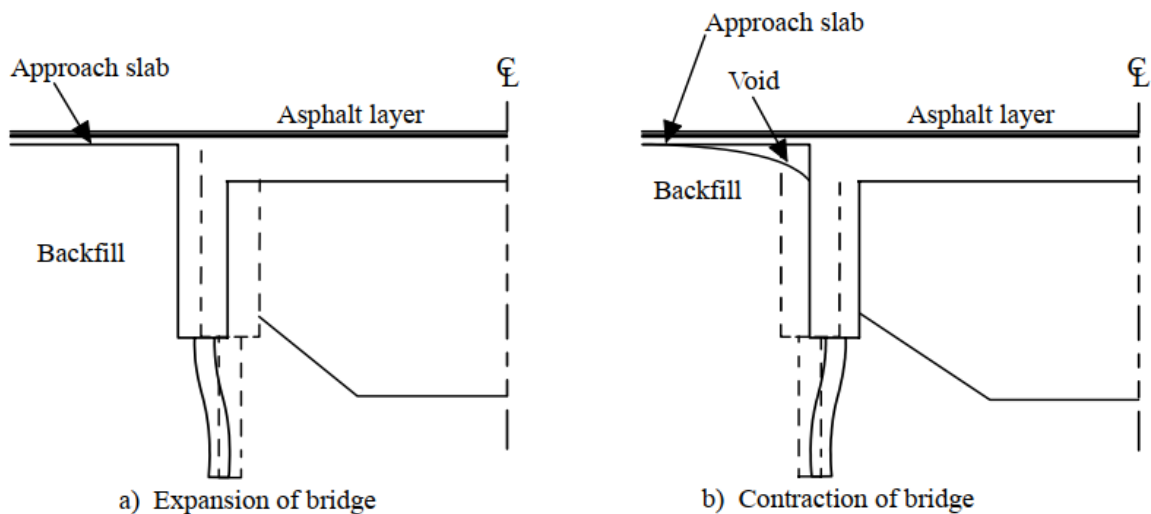
MYND 3 Kröfur Vegagerðarinnar [5] um aðgengi að legum í hlutasamfelldum brúm.

Samfelldar brýr (e. integral bridges) eru hinsvegar án bæði þensluraufa og lega, sjá efstu línuna á mynd 1. Í samfelldum brúm hreyfast endastöplarnir með brúargólfinu sem veldur auknu álagi á endaveggina. Hreyfingar brúargólfsins þurfa því allar að vera teknar upp á milli aðlægrar fyllingar og burðarvirkis þar sem hreyfingar vegfyllingarinnar eru nánast óháðar hitabreytingum ólíkt brúargólfinu. Samfelldar brýr breyta því staðsetningunni og einkennum á vandamálum vegna hreyfanleika brúa frá þensluraufum yfir í vandamál á milli jarðvegs og burðavirkis en eyða þeim ekki [6].

Þar sem láréttar hreyfingar brúargólfsins eru í réttu hlutfalli við heildarlengd brúa þá takmarkar geta jarðvegsins og burðarvirkisins til að taka upp færslurnar það hversu langar samfelldar brýr geta verið án þess að það fari að valda vandamálum. Samfelldar brýr eru því vinsæll kostur fyrir stuttar brýr (<30-50 m langar). Vegna hagkvæmni stuttra samfelldra brúa setur Norska veghandbókin [4] kröfu um að allar brýr með heildarlengd minni en 50 m skuli vera án þensluraufa.

3 ÁSKORANIR Í HÖNNUN SAMFELLDRA BRÚA

Algengasta sjáanlega vandamál samfelldra- eða hluta samfelldra brúa er dæld eða sprungur sem myndast í yfirborði slitlags við brúarendu [3]. Gylfi og Helgi [3] rannsökuðu skemmdir á yfirborði slitlagsins á brúarendum við samfelldar brýr á Íslandi og þeir telja helstu orsök skemmdanna vera hreyfingar brúargólfsins vegna hitabreytinga ásamt skriði og rýrnun steypu. Þegar steypa rýrnar og kólnar á veturna þá dregst brúargólfið saman og þá myndast holrými fyrir aftan endastöpulinn sem fyllingin getur sigið niður í, sjá mynd 4 [8]. Á sumrin þegar brúargólfið hitnar þá þrýstist hinsvegar brúargólfið í fyllinguna vegna hitaþensla og þjappar fyllinguna saman.



MYND 4 Hreyfing endastöpla brúa vegna hitabreytinga og myndun holrýmis vegna hreyfinganna [8]

White o.fl [2] [8] rannsökuðu 74 brýr í Iowa, Bandaríkjunum, þar af voru 13 samfelldar brýr. Þeir komust að því að við 25% brúa myndast holrými í fyllinguna við endabita brúa innan við ári eftir að brúin er tekin í notkun. Þeir telja myndun holrýmisins algengari hjá samfelldum brúm heldur en hjá brúm með þensluráufum. Holrýmið sem myndast og tilsvandi rof (e. erosion) getur valdið vandamálum eins og að afhjúpa staura (sem veðrast eða ryðga þá hraðar), skemma fláa fyllingarinnar og valdið skemmdum í siglötunni þar sem hún missir undirstöðuna.

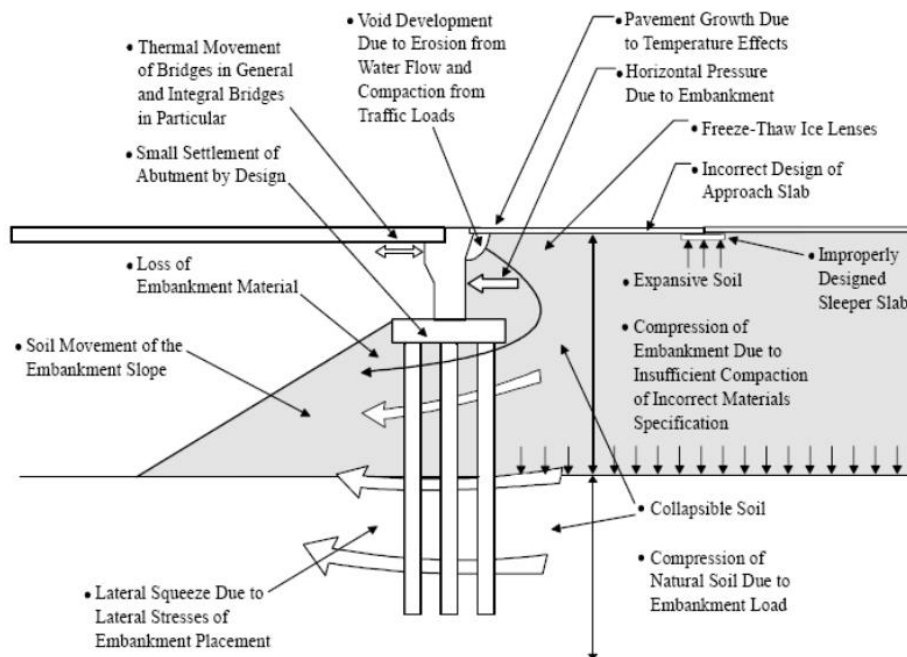
Helstu orsakir á myndun holrýmisins við endabita brúa samkvæmt White o.fl [2] [8] voru óvönduð vinnubrögð, lélegt dren og illa þjöppuð fylling úr ekki nógu góðu efni. Þeir rekja mikið af

vatnsskemmdunum í fyllingunni og endastöplum til raufarinnar á milli sigplötunnar og endabitans ef það er ekki tengt saman og vatnspéttni samskeytanna tryggð.

Briaud, James og Hoffman [9] telja myndun skemmda í yfirborði slitlags við brúarenda hrjá yfir 25% brúa í Bandaríkjunum og vilja þeir meina að vandamálið sé enn þá algengara fyrir samfelldar brýr. Þeir tóku saman helstu orsakir skemmda í slitlagi vega við samfelldar brýr, sjá mynd 5. Orsakirnar eru margar og mismunandi en þrjár helstu orsakirnar samkvæmt þeim eru:

- Láréttar hreyfingar endastöpla og mismunasig jarðvegs
- Tæringar- og veðrunarvandamál
- Samþjöppun bakfyllingar

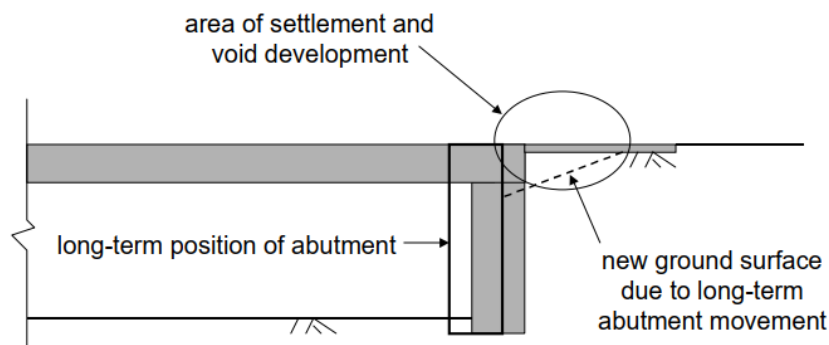
Þar sem áherslan í þessari rannsókn er á orsakir skemmda í yfirborði slitlags við brúarenda samfelldra brúa þá verður fjallað nánar um þessa þrjá flokka hjá Briaud, James og Hoffman [9].



MYND 5 Orsakir skemmda á yfirborði slitlags við samfelldar brýr eru margvíslegar [9]

3.1.1 Láréttar hreyfingar endastöpla og mismunasig jarðvegs

Brýr þenjast út og stytast yfir líftíma sinn vegna hitabreytinga. Hreyfingarnar eru breytilegar, bæði innan dags og á milli árstíða. Stærðargráða hreyfinganna ræðst af lengd brúarinnar, hitaþenslustuðli og hitabreytingunum [8]. Hitabreytingin er mæld sem hámarks útgildi frá hitastiginu þegar brúin er smíðuð. Á mynd 6 má sjá hvernig holrými myndast við endastöpla brúarinnar við lotubundnar hitabreytingar og vegna skriðs og rýrnunar steypu [6]. Ef að sigplata er ekki notuð við brúarendana þá geta myndast sprungur í slitlaginu eða dæld í slitlagið vegna holrýmisins. Því er þörf á tíðari viðgerðum á slitlaginu við brúarendana heldur en annars staðar á veginum.



MYND 6 Vegna lotubundna hreyfinga brúargólfsins vegna hitabreytinga og skriðs og rýrnunar steypu myndast holrúm við endastöpla [6].

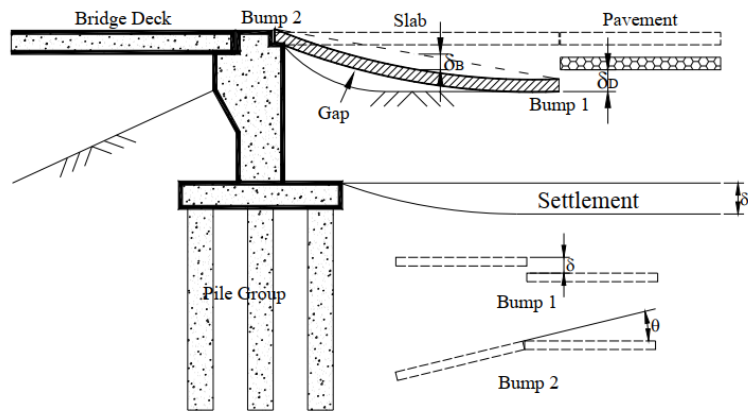
Í rannsókn Wendner og Strauss [10], sem byggðist á vöktun á 68 m langri samfelldri brú, kom í ljós að brúin lengdist aðeins um 42% af því sem búist var við miðað við frjálsa hreyfingu brúarendanna vegna hitabreytinga. Niðurstöðurnar benda því til þess að endastöplarnir taka aðeins upp hitabenslurnar að hluta upp sem lárétta hreyfingu og halla endastöplanna, restin er tekin upp sem innri kraftar í burðarvirkinu eða sem snúningur brúarinnar í heild sinni. Wendner og Strauss [10] álykta að hönnunarforsendan um að brúarendarnir hafi frjálsa hreyfingu sé óraunsæ og geti vanmetið innri krafta burðarvirkisins.

Í steypum brúm skriður og rýrnar steypan að auki með tímanum sem veldur styttingu á brúargólfinu og varanlegum færslum á endastölpunum, sjá mynd 6. Gylfi og Helgi [3] rannsökuðu ástand þriggja brúa og beindu sérstakri athygli að sigi við brúarendana vegna hitabreytinga og skriðs og rýrnunar steypu. Niðurstaða þeirra er að skrið og rýrnun eftirspenntra steyptra brúa geti átt töluverðan þátt í siginu við brúarenda samfelldra brúa. Þeir álykta að byggingartíminn, þ.e. hversu langt líður frá uppspennu brúarinnar og að frágangi slitlags, geti ráðið hversu mikið sigið verði og hversu oft þurfi að gera við slitlagið við brúarendana. Í Sviss er samskonar hugsun, þ.e. gamlar brýr með þensluraufum og legubúnaði eru oft endurbættar með því að taka þensluraufina en láta leguna vera eftir vegna þess að þá hefur skrið og rýrnun steypunnar þegar átt sér stað [1].

Sigplötur eru yfirleitt notaðar til að dreifa umferðaralaginu á vegfyllinguna, brúa holrýmið sem vill myndast við brúarendana ásamt því að brúa skilin á milli misstífra mannvirkja, þ.e. frá stífum undirstöðum brúarinnar og yfir á sveigjanlegri vegfyllingu. Þegar sigplatan missir stuðninginn frá jarðveginum þá eykst þörfin á vægisburðargetu plötunnar og ef sigplatan er ekki hönnuð til að bera umferðaralagið getur sig vegfyllingarinnar orsakað brot í sigplötunni.

Sig í vegfyllingunni er ekki einungis staðbundið við endastöplana vegna lotubundinna hreyfinga þeirra heldur getur jarðvegurinn undir vegfyllingunni sigið með tíma vegna aukins varanlegs álags frá vegbyggingunni. Tímaháða sig jarðvegsins (e. consolidation) lækkar yfirborð aðlæga vegarins með tímanum en þegar endastöplarnir eru grundaðir á djúpum staurum eru hreyfingar þeirra nánast óháðir siginu á jarðveginum. Á mynd 7 má sjá hvað gerist þegar bæði jarðvegurinn sígur með tíma vegna aukins álags frá vegfyllingunni og sigplatan missir burð vegna holrýmis sem myndast undir sigplötunni. Halli sigplötunnar breytist út af mismunarsiginu og sigplatan á það til að svigna með tíma út af umferðaralaginu [11]. Notkun sigplötu í yfirborði vegsins breytir vandamálinu frá því að vera aðallega

spurning um sprungumyndun í slitlaginu yfir í vandamál vegna skarpar breytingar á veghallanum við brúarendann.

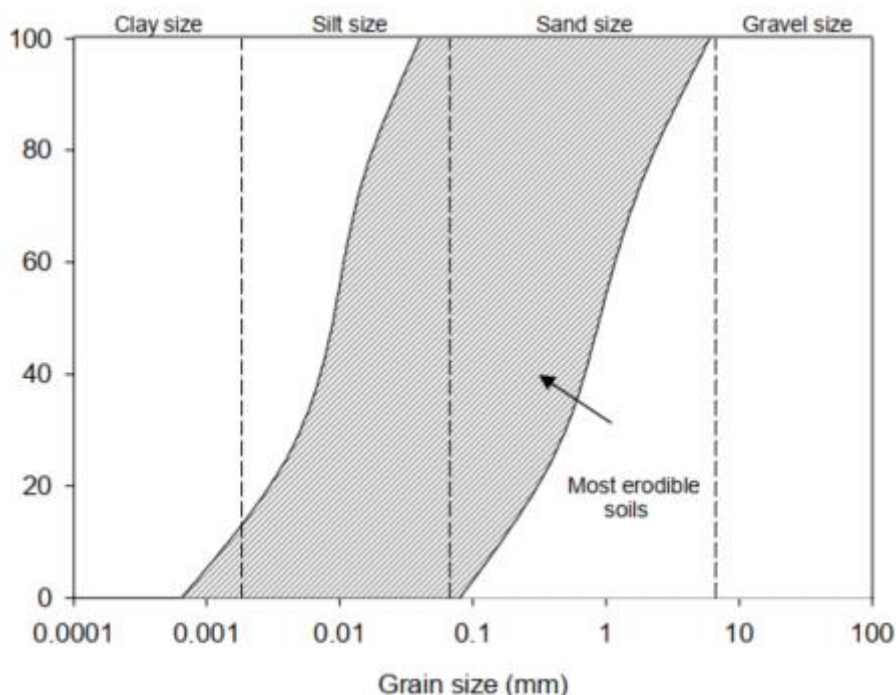


MYND 7 Sig og svignun sigplötunnar vegna mismunansígs á milli vegfyllingar og endastöpla ásamt holrýmismyndun undir sigplötunni vegna láréttra hreyfinga endastöpla [11].

Út frá rannsókn á hönnun og notkun sigplatna ályktaði Hoppe [12] að ef breytingin á veghallanum er orðin meiri heldur en $1/125$ þá sé orðin þörf á viðgerðum á sigplötunni. Hann miðar einnig við breytingu á halla upp á $1/200$ sem þægindamörk fyrir notendur. Hoppe [12] ráðleggur því að lengd sigplötunnar sé í hlutfalli við sigið sem er búist við að eigi sér stað í vegfyllingunni og jarðveginum. Hoppe [12] leggur einnig til að láta vegfyllinguna halla upp frá brúarendanum með viðbótar halla upp á $1/200$, þá getur vegfyllingin sigið meira án þess að þörf sé á viðgerðum.

3.1.2 Tæringar og veðrunarvandamál

White o.fl [2] rannsökuðu ástand 74 brúarenda í Iowa fylki í Bandaríkjunum og komust að því að 60% af þeim voru með ófullnægjandi afvötnun. Þeir töldu þrjár ástæður liggja að baki; léleg afvötnun á yfirborðsvatni, ónæg gleypni fyllingar og notkun efna sem veðrast í fyllingar. Helstu mistök í afvötnun á yfirborðsvatni eru að beina yfirborðsvatninu í þensluraufar, meðfram endastöplum eða vængveggjum. Þeir benda því á mikilvægi þess að þetta þensluraufar og samskeyti þ.a. vatn komist ekki í gegn. Enn fremur telja White o.fl. [2] þörf á að tryggja leið fyrir vatnið niður fyrir endastöpla, annars sé hættu á að vatnið beri með sér fínefnin úr fyllingunni sem veldur því að lagnir stíflast sem eykur enn frekar á veðrunarvandamál við endastöpla. White o.fl. [2] telja því að forðast ætti notkun fínefna í fyllingu sem eiga í hættu á að veðrast. Á mynd 8 má sjá hvaða svæði ætti að forðast við skilgreiningu á kornastærðadreifingu á fyllingu. White o.fl. [2] mæla með notkun á grófkornóttum gleyptum jarðvegi til að minnka líkurnar á veðrun fyllingarinnar og til að bæta afvötnun fyllingarinnar, þ.a. ef að vatn kemst frá yfirborðinu niður í fyllinguna þá komist vatnið greiðlega í burtu.



MYND 8 Kornastærðardreifingar sem veðrast mikið og ætti að forðast að nota í fyllingar við endastöpla [8].

White o.fl. [8] gerðu tilraunir á veðrunareiginleikum endastöpla eftir því hvernig frágangur endastöpla er háttað. Þeir skoðuðu sérstaklega hvaða aðferðir við að dreina bakfyllinguna höfðu áhrif á sigplötunnar. Þeir bjuggu til raun-skala líkön af mismunandi frágangi endastöpla og létu vatn renna um endafráganginn. Niðurstaða þeirra er að granular fylling sé slæm í bakfyllingu endastöpla vegna lélegs drengs. Gljúpt (e. porous) fyllingarefni með litla veðrun kom töluvert betur út heldur en granular fyllingarefnið. White o.fl. [8] rannsökuðu einnig mismunandi lausnir á frágangi drenlagna við bakvegg og sýndu þeir fram á að vönduð vinnubrögð við drenlagnir margfaldaði skilvirkni drenlagnanna. Þeir rannsökuðu einnig notkun dekkjakurlis við bakvegg endastöpla til að auka dren getu fyllingarinnar sem kom betur út heldur en notkun drenlagna.

3.1.3 Jarðþrýstingur

Þegar brúin dregst saman á veturna þá vill hluti af fyllingunni síga ofan í holrúmið sem myndast fyrir aftan endastöpulinn á samfeldum brúm. Á sumrin þegar brúin þenst út aftur þá þrýstir endaveggurinn á fyllinguna en þar sem sá hluti sem seig þrýstist ekki aftur upp á sama stað heldur inn í fyllinguna þá eykst jarðþrýstingurinn með tímanum og varanleg staða endastöplins getur breyst, sjá mynd 6 [6]. Þessi stigvaxandi aukning á jarðþrýstingi vegna hitabreytinga í brúargólfinu er kölluð *ratcheting* á ensku og getur valdið því að jarðþrýstingurinn nálgist óvirkan (e. passive) þrýsting [6].

Í hönnunarreglum Vegagerðarinnar fyrir brýr [5] er gerð krafa um að hanna undirliggjandi vegg þensluraufarfrirra brúa fyrir hvíluþrýstingi eða óvirkum (e. passive) jarðþrýstingi eftir því hvaða færslum megi búast við. Vegagerðin [5] skilgreinir heildarjarðþrýstingsstuðul fyrir jarðþrýstinginn sem verkar á burðarvirki sem ýtist að jarðvegi með eftirfarandi jöfnu:

$$k = \begin{cases} k_0 + (k_p - k_0) \cdot \frac{\delta}{\delta_p} & ; 0 \leq \delta \leq \delta_p \\ k_p & ; \delta > \delta_p \end{cases}$$

Þar sem:

- k_0 er stuðull fyrir hvíluþrýsting
- k_p er stuðull vega óvirks (e. passive) jarðþrýstings
- δ er raunveruleg færsla
- δ_p er færsla við fulla virkjun óvirks jarðþrýstings. Það má miða við að $\delta_p = H/200$ þar sem H er hæð undirliggjandi veggjar.

Endastöplarnir á Íslandi eru því hannaðir fyrir jarðþrýstingi sem er línulega vaxandi með dýpt og hallatalan ræðst af væntanlegum færslum endastöplansins.

Erlendis hafa rannsóknir verið gerðar á jarðþrýstingi við endastöpla samfelldra brúa. Flestar rannsóknirnar miða að því að vakta samfelldar brýr, herma aðstæður sem má búast við hjá endastöplum með aðstoð reiknilíkana eða gera raun-skala tilraunir.

Cosgrove og Lehane [13] rannsökuðu jarðvegsþrýsting við endastöpla samfelldra brúa með því að smíða raun-skala líkan af endavegg með óþjappaðri fyllingu fyrir aftan bakvegginn. Niðurstöður þeirra benda til að jarðþrýstingurinn nálgist óvirkan þrýsting vegna lotubundna hreyfinga endastöplanna, jafnvel þótt að hreyfingarnar séu litlar. Þeir rekja aukningu jarðþrýstingsins til lotubundnu hreyfinga fyllingarinnar, þ.e. að fyllingin þjappast saman með tímanum vegna hreyfinga endastöplansins sem veldur auknum stífleika. Cosgrove og Lehane [13] drógu einnig þá ályktun út frá rannsókninni að lengd holrýmisisins sem myndast undir siglötunni sé í réttu hlutfalli við hæð endastöplansins sem hreyfist með hitabreytingunum og virkt skerhorn fyllingarinnar.

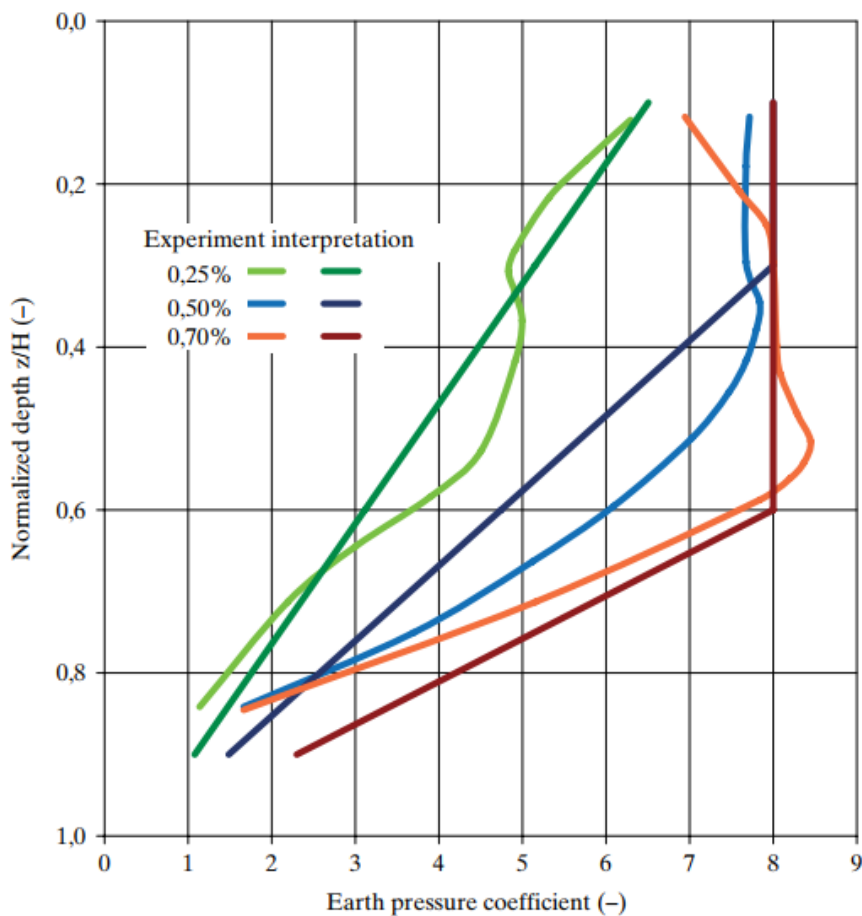
Thomson og Lutenegger [14] rannsökuðu óvirkan jarðþrýsting á endastöpla með raun-skala rannsókn. Í rannsókninni skoðuðu þeir áhrif legu vængveggja þegar endastöpullinn þrýstist í fyllinguna. Þeir hermdu hreyfingu 2,5 m hás endastöplans með því að þrýsta ofarlega á hann þ.a. að veggurinn snerist frekar en að hliðrast, líkt og gerist þegar brúargólfíð þenst út. Þeir notuðu granular fyllingu sem uppfyllti kröfur til fyllingar við endastöpla í Massachusetts. Fyllingin var lögð út í 30 cm lögum og þjöppuð.

Niðurstöður Thomson og Lutenegger [14] benda til þess að lega vængveggja hafi mikil áhrif á svörun fyllingarinnar við láréttum færslum endastöplans. Ef vængveggirnir eru þvert á endavegg, þ.e. samsíða langátt brúar, þá þarf mesta kraftinn til að endaveggurinn geti færst og hámarks lárétti krafturinn frá fyllingunni verkar ofar á vegginn en krafturinn lækkar hraðar með dýpt en ef vængveggirnir væru samsíða endaveggnum. Thomson og Lutenegger [14] telja ástæðuna megi rekja til þess að fyllingin hefur minna rúmmál til að taka upp færslurnar ef vængveggirnir eru þvert á endavegg og því veiti fyllingin meira viðnám gegn færslunni. Ástæðu hraðari lækkunar lárétts krafts með dýpt telja þeir að megi rekja til þess að snúningspunktur veggjarins sé ofar út af stífari fyllingu ásamt því að vængveggirnir færðust í burtu frá fyllingunni þegar endastöpullinn þrýstist í fyllinguna. Vængveggirnir urðu fyrir virkum (e. active) jarðþrýstingi þegar vængveggirnir voru þvert á endastöpulinn en annars urðu þeir fyrir hvíluþrýstingi.

Niðurstöður Thomson og Lutenegger [14] benda einnig til þess að láréttur jarðþrýstingur sé mestur í um 1/3 af hæð endastöpsuls frá yfirborði fyllingarinnar og lækki síðan aftur þegar neðar dregur og nálgist núll við neðri brún endastöpla. Hámarksgildið á jarðþrýstingnum nálgast óvirkan jarðþrýsting við litlar hreyfingar eða um 0,5 % hlutfallslegri færslu. Thomson og Lutenegger [14] álykta að hönnun endastöpla fyrir óvirkum jarðþrýstingi yfir alla hæð endastöplans sé því mjög íhaldsöm hönnun.

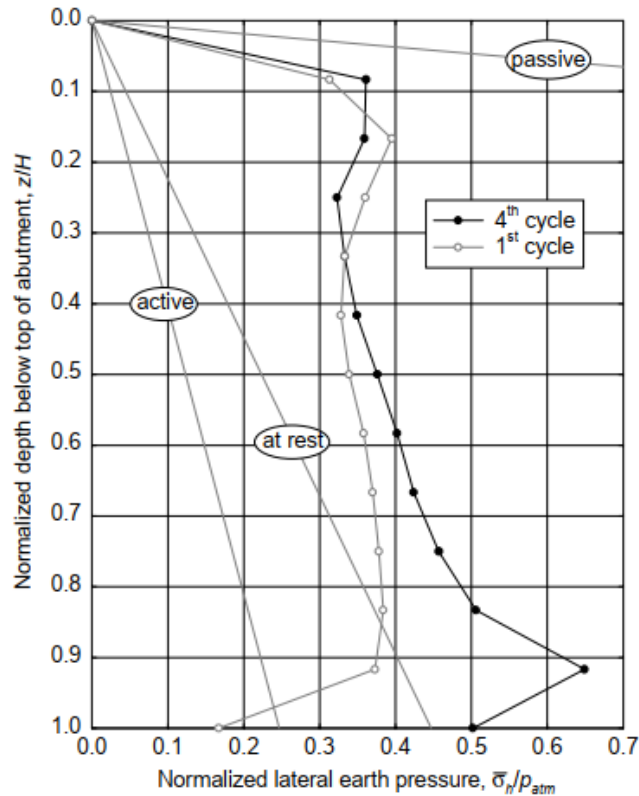
Rannsókn Hoppe [15] sem byggir á vöktun á 100 m langri samvirkandi brú sem var vöktuð í 5 ár bendir til sömu niðurstaðna og rannsókn Thomson og Lutenegger, þ.e. að jarðþrýstingsdreifingin sé þríhyrningslaga með hágildi í um 1/2-1/3 af hæð endastöpsulsins frá yfirborði fyllingar. Hoppe ráðleggur að nota jarðþrýstingsstuðulinn fyrir óvirkan jarðþrýsting $k_p = 4$ fyrir endastöpla þar sem frauðplast er notað til dempunar á hitaþenslunum.

Rannsókn Rodriguez, Martinez og Marti [16] á jarðþrýstingi við endastöpla samfelldra brúa er einnig í samræmi við niðurstöður Thomson og Lutenegger, þ.e. að jarðþrýstingurinn sé mestur í um 1/3 af hæðinni og minnki þegar neðar dregur. Þeir benda þó á að jarðþrýstingurinn sé mismikill eftir því hversu miklum færslum á endaveggnum megi búast við en í þeirra rannsókn fór jarðþrýstingsstuðullinn, k , ekki yfir 8, sjá mynd 9. Þeir ráðleggja því að nota gildið $k = 8$ á jarðþrýstingsstuðlinum sem hámark. Í rannsókn Rodriguez, Martinez og Marti [16] var notað 75 GN/m sem stífni fyllinga við endastöpla með hámark upp á 3 GN.



MYND 9 Dreifing á jarðþrýstingi eftir hæð endastöpla fyrir mismunandi færslur endastöpla [16].

Horvath [6] rannsakaði tengslin á milli lotubundna hreyfinga endastöpla á samfelldum brúm og áhrif þeirra á jarðvegsþrýsting á endastöplana. Rannsóknin fór fram í einingarforritinu SSTIPNH og niðurstöðurnar benda til þess að jarðþrýstingurinn nálgist óvirkan jarðþrýsting efst í endastöplinum þegar brúargólfíð þenst út í hita, sjá mynd 10. Á myndinni vex jarðþrýstingurinn hægar með dýpt heldur en fræðin segja til um fyrir óvirkan jarðþrýsting og nálgast jarðþrýstingurinn hvíluþrýsting fyrir neðri hluta endastöpsins. Niðurstöðurnar benda einnig til þess að jarðþrýstingurinn aukist mest neðst við endavegginn vegna lotubundinna hitaþensla brúargólfsins.



MYND 10 Láréttur jarðþrýstingur á endastöpla samfelldra brúa vegna lotubundna hitaþensla [6].

Kerokoski [17] rannsakaði svörun 56 m langrar brúar við hitabreytingum. Brúin var vöktuð í þrjú ár eftir að smíði hennar lauk og var áherslan á jarðvegsþrýsting við endastöpla, hitabreytingar og áhrif þeirra. Yfir kaldasta tímenn mældist enginn jarðvegsþrýstingur á endastöplana sem bendir til þess að holrými hafi myndast á milli fyllingarinnar og endastöplanna. Þegar brúin lengdist á stuttu tímabili í febrúar 2004 þá mældist meðal jarðþrýstingsaukning um 80 kPa þegar brúin lengdist um 5,2 mm. Jarðvegsstífnin mældist því:

$$k_s = \frac{80 \frac{kN}{m^2}}{5,2 \text{ mm}} = 15 \text{ MN}/m^3$$

Jarðþrýstingurinn var hins vegar aðeins breytilegur við endastöpullinn, hann var minni við vængveggina en jókst nær miðju stöpsins. Færsla neðsta hluta endastöpsins var aðeins um 60-75% af færslu efsta hluta stöpsins. Það bendir til þess að endastöpullinn sé bæði að hliðrast og snúast þegar brúargólfíð tekur út hitabreytingar.

3.1.4 Samantekt

Pensluraufar hefðbundna brúa hafa þótt kostnaðarsamar og viðhaldsfrekar í brúm og því hafa samfelldar og hlutasamfelldar brýr aukist í vinsældum undanfarið. Samfelldar brýr eru ekki lausar við hreyfingavandamál brúa heldur er því aðeins breytt frá því að vera vandamál við pensluraufar yfir í samspil jarðvegs-burðavirkis vandamál. Eins og hefur komið fram hér að ofan eru birtingarmyndir jarðvegs-burðavirkis vandamála með margar mismunandi orsakir og með ólíkar birtingamyndir.

Helsta sjáanlega vandamál samfelldra og hlutasamfelldra brúa er dæld eða sprunga sem myndast í slitlagi aðlægs vegyfirborðs. Helstu orsakir skemmda á samfelldum brúm má rekja til:

- Láréttra hreyfinga brúargólfsins (hitabreytinga, láréttir kraftar, skrið og rýrnun steypu)
- Mismunasig á milli endastöpla og fyllingar
- Ófullnægjandi sigplötur
- Tæringar- og veðrunarvandamál
- Stigvaxandi jarðþrýstingur

4 ERLENDAR RANNSÓKNIR Á SAMFELLDUM BRÚM

Þar sem orsakir skemmda á yfirborði slitlags eru margvíslegar og misjafnt milli rannsókna hvað sé talið helsta orsökina á skemmdunum, þá hafa margar mismunandi hugmyndir af lausnum verið rannsakaðar. Flestar lausnirnar miða að því að draga úr eða leysa ákveðna orsök skemmdanna. Í sumum rannsóknum eru fleiri en ein lausn notuð á sama tíma og því getur verið erfitt að segja hvaða þáttur lausnarinnar sé að draga úr skemmdunum. Í grófum dráttum má skipta lausnunum í þrjá hluta og verður fjallað um hverja lausn sérstaklega:

1. Gæðakröfur bakfyllingar
2. Notkun frauðplasts við endastöpla
3. Hönnun og frágangur sigplötunnar

4.1.1 Gæðakröfur bakfyllingar

Fyllingin bakvið endastöpla brúa á í hættu að síga þar sem erfitt er að þjappa fyllinguna vegna krefjandi vinnuaðstæðna auk þess sem hún verður fyrir endurteknu umferðarálagi. Til að lágmarka sig fyllingarinnar rannsökuðu White o.fl [8] hvaða efniskröfur og vinnuaðferðir ætti að nota til að lágmarka líkurnar á sigi. Þeir ráðlögðu að nota efni sem er:

- Auðþjappanlegt
- Með línulega hegðun (e. elastic behaviour)
- Ekkert tímaháð sig (e. consolidation)
- Einsleitt, grófkornótt efni til að forðast of mikla viðloðun

Enn fremur ráðlögðu þeir að huga vel að rakastigi jarðvegsins þegar hann er þjappaður þar sem ofgnótt af vatni getur valdið hruni (e. collapse) á ákveðnum tegundum efna auk þess að stífla frárennslirör í fyllingunni. Að lokum nefndu þeir notkun jarðvegsstyrkjandi efna (e. geosynthetic materials) svo sem jarðvegsdúks eða jarðvegshólfa (e. geogrid) sem möguleika til að draga úr sigi fyllinga.

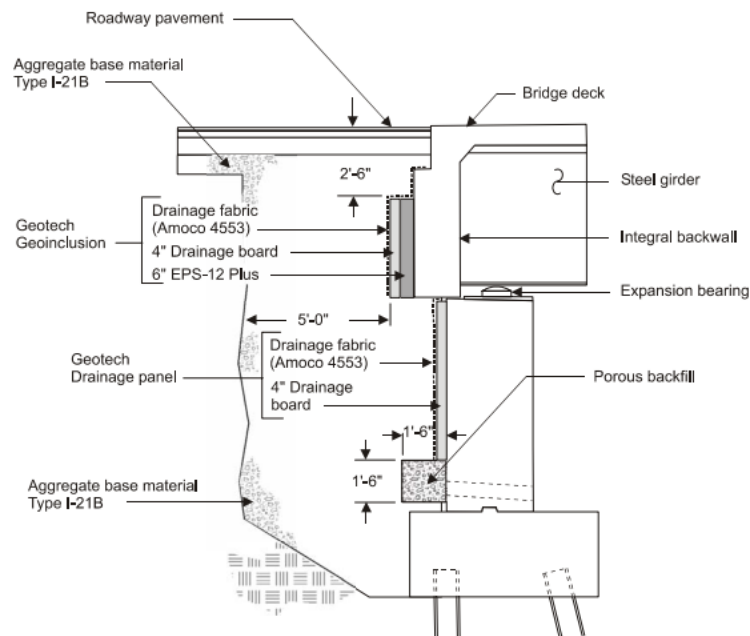
Ófullnægjandi fylling getur valdið mismunasigi á milli endastöpla og vegfyllingar. Miao o.fl. [18] rannsökuðu notkun jarðvegsnets gegn staðbundnu sigi á fyllingu. Þeir notuðu vatnsblöðru staðsetta undir jarðvegi til að líkja eftir því þegar jarðvegur sígur. Þeir mældu síðan sig jarðvegsins við

vatnsblöðruna og við yfirborðið þegar eitt eða tvö jarðvegsnet eru notuð eða þeim sleppt. Niðurstöður rannsóknarinnar benda til þess að notkun jarðvegsnets geti dregið úr siginu á yfirborði um allt að 70% miðað við ef jarðvegsnetinu er sleppt.

4.1.2 Notkun frauðplasts bakvið endastöpla

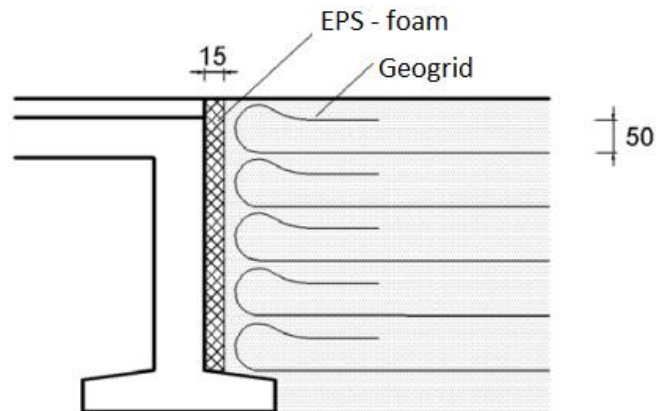
Notkun frauðplasts (e. Expanded Polystyrene, EPS) við bakvegg endastöpla hefur meðal annars verið rannsakað af Horvath, Hoppe og Pötzl [6] [15] [19]. Tilgangur frauðplastsins er að taka upp færslur endastöplanna þegar brúargólfíð hreyfist í hitabreytingum og draga úr lárétta jarðþrýstingnum sem myndast við færslurnar [15]. Frauðplastið er nógu stíft til að þola lóðrétt umferðaralag og styðja við slitlag en nógu eftirgefanlegt til að taka upp láréttu færslurnar.

Hoppe [15] rannsakaði notkun frauðplasts sem dempara á láréttum hitafærslum fyrir um 100 m langa brú í Virginia. Brúin var tekin í notkun árið 1999 og var vöktuð í 5 ár og svörun brúarinnar var borin saman við aðra samskonar brú við hliðina á sem er án frauðplasts. Við hönnun brúarinnar var notað 250 mm af teygjanlegu frauðplasti (e. Elasticized EPS) við endastöplana. Brúin var hluta-samfelld, þ.e. endabiti brúargólfsins hvílir á legu þ.a. yfirbyggingin hreyfist sem ein heild en millistöplarnir og endastöplar hreyfast ekki með brúargólfinu, sjá mynd 11. Það þurfti aðeins einu sinni að laga sig við brúarendann á vöktunartímabilinu en það þurfti ítrekað að laga sig sem myndaðist við brúnna við hliðina sem var ekki með teygjanlegu frauðplasti. Þegar sigið var lagað þá þurfti að malbika 60 cm rönd meðfram brúarendanum sem bendir til þess að jarðsigið sé mest upp við brúarendann. Niðurstöður rannsóknarinnar benda til þess að notkun á 250 mm þykku lagi af teygjanlegu frauðplasti sem dempara sé skilvirk aðferð í að draga úr jarðvegssigi við brúarenda. Hoppe [15] tekur fram að notkun sigplötu við brúarendann hefði getað komið í veg fyrir þörfina á lagfæringu malbiksins við brúarendann og sigplötuna ætti að hanna til þess að brúa 1 m holrými við brúarendann.



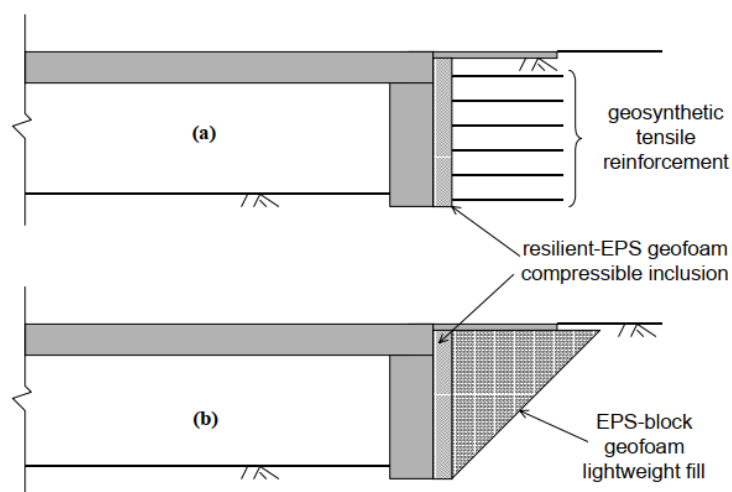
MYND 11 Frágangur endastöpla með teygjanlegu frauðplasti sem dempara í brú í Virginia [15].

Í raun-skala-rannsókn Pötzl [19] á notkun frauðplasts við bakvegg endastöpla og jarðvegsdúks til styrkingar fyllingar, sjá mynd 12, greindi hann ekki lóðréttu hreyfingu á yfirborði bakfyllingar fyrr en lárétt færsla endastöpsulsins hafði náð 120 mm. Við þá færslu mældist 10 mm ris á jarðveginum um 2 m fyrir aftan stöpulinn. Enn fremur mældi Pötzl [19] enga togkrafta í jarðveginum við samdrátt endastöpsulsins og aðeins brot af áætluðum jarðvegsþrýstingi við hitaþenslur endastöpsulsins. Pötzl [19] ályktar því að samnýting frauðplasts og jarðvegsstyrkingar sé góður kostur við hönnun sveigjanlegrar undirstöðu samfelldra brúa til að ráða bæði við samdrátt og þenslur brúargólfsins vegna hitabreytinga.



MYND 12 Notkun frauðplasts sem dempara fyrir hitaþenslur samfelldra brúa og jarðvegsstyrking gagnvart samdrætti brúargólfsins, einingar í cm [19].

Horvath [6] rannsakaði svörun nokkurra útfærslna á frágangi brúarenda með aðstoðar einingarreiknilíkansins (FEM forrit) SSTIPNH. Í rannsókninni bar hann saman samnýtingu frauðplasts, sem dempara á láréttum færslum endastöpla við bakvegg endastöpla og styrkingu fyllingarinnar við bakvegg og bar þær lausnir saman við grunntilfelli þar sem hvorugt var notað. Hann skoðaði einnig svörun endastöpsulsins ef bara annað hvort frauðplast eða jarðvegsstyrking var notuð. Horvath [6] skoðaði tvær mismunandi útgáfur jarðvegsstyrkingarinnar samhliða notkun frauðplasts, annars vegar með jarðvegsdúkum og hinsvegar notkun frauðplastseininga sem mynda sjálfstætt standandi veggenda, sjá mynd 13.



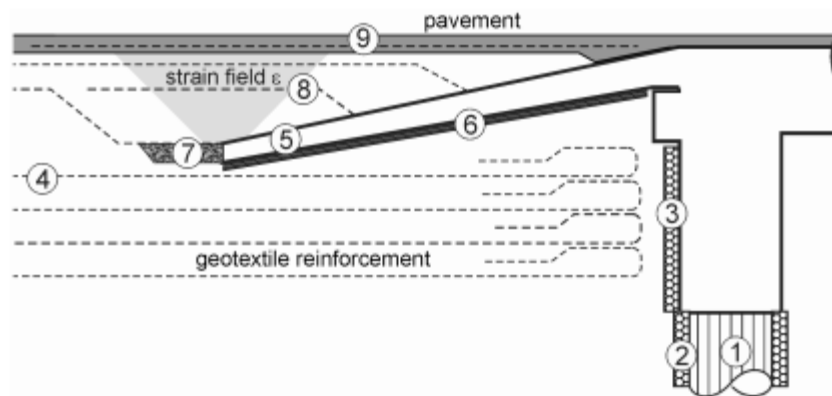
MYND 13 Frágangur endastöpla í rannsókn Horvath [6], notkun frauðplasts sem dempara ásamt styrkingu jarðvegs með (a) jarðvegsdúk eða (b) sjálfstætt standandi frauðplastseininga.

Horvath [6] ályktar út frá rannsókninni að til að koma í veg fyrir myndun skemmda í yfirborði slitlags við brúarenda við samfelldar brýr þurfi tvíþætta lausn:

- Samþjappanlegt efni aftan við endabita eða endastöpla samfelldra eða hlutasamfelldra brúa til að taka upp hitafærslur brúargólfsins.
- Í eðli sínu sjálfstætt standandi fyllingu bakvið endastöpla til að koma í veg fyrir sig á fyllingunni þegar brúargólfið dregst saman í kulda eða steypa rýrnar.

Samþjappanlega efnið minnkar einnig láréttan jarðþrýsting og kemur í veg fyrir stigvaxandi jarðvegsþrýsting vegna lotubundna hitabreytinga brúarinnar [6]. Frauðplast eða annað samþjappanlegt efni er því ekki nóg eitt og sér til að koma í veg fyrir skemmdir á slitlagi við brúarenda samfelldra brúa, til þess þurfi einnig að styrkja jarðveginn. Í rannsókninni kom sjálfstætt standandi veggur úr EPS-einingum best út til að draga úr jarðvegssigi en styrking jarðvegsins með dúkum fylgdi fast á eftir.

Wender og Strauss [10] rannsökuðu skilvirkni endafrágangs á 67 m langri brú í Austurríki, sjá mynd 14. Á myndinni má sjá snið í annan endastöpulinn og frágang brúarendans. Í endastöplunum voru stakar raðir staura (1), sem voru með frauðplast í kringum sig (2) til að auka sveigjanleika endastöpsulsins. Lausnin notar teygjanlegt frauðplast (3) við endabita brúargólfsins og jarðvegsstyrkingar (4) ásamt skáhallandi sigplötu (5) sem er stíftengd brúargólfinu. Hlutverk sigplötunnar er að flytja staðinn þar sem hámarks færslur burðavirkisins í jarðveginum vegna hitabreytinga eiga sér stað í burtu frá brúarendanum (7). Hugmyndin er bæði að auðvelda jarðveginum að formbreytast undan hreyfingunum og að hafa þykkara lag fyrir ofan til að dreifa formbreytingunum. Auk þess notar lausnin jarðvegsstyrkingu fyrir ofan sigplötuna (8) og tvöfalt lag af malbiki sem er styrkt með trefjum (e. fiber reinforced) (9) til að minnka sigið og dreifa sprungunum í malbikinu.



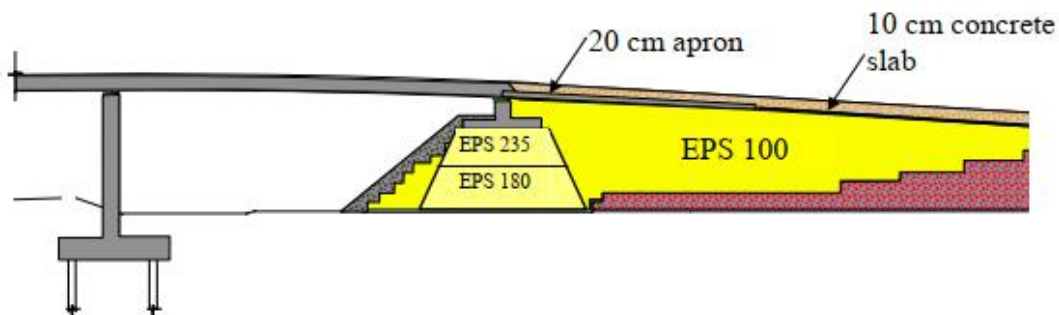
MYND 14 Frágangur við endastöpla með nýtingu frauðplasts (3) og styrkingu jarðvegs (4) [10].

Jarðvegsstyrkingin hjá Wender og Strauss [10] var ofið jarðnet (e. geogrid) úr gripmiklu (e. polyethylene terephthalate (PET)) efni og hulið með PVC húð. Netið er með 35 x 35 mm möskvastærð og voru 4 lög lögð neðan við sigplötuna og 2 ofan við hana. Hlutverk jarðvegsstyrkinganna er annars vegar að styðja við jarðveginn undir sigplötunni þegar steypa rýrnar og hinsvegar að dreifa streitunni sem myndast í jarðveginum fyrir ofan sigplötuna sem færsla sigplötunnar veldur.

Niðurstöður Wender og Strauss [10] benda til þess að streitan safnast saman í jarðveginum við enda sigplötunnar og að staðbundna samþjöppunin á fyllingunni leitar upp á við sem orsakar skemmdir á

slitlaginu. Jarðvegsstyrkingarnar fyrir ofan sigplötuna og tvöfalda trefjastyrkta malbikið draga úr streitunni á malbikinu miðað við streituna á endanum á sigplötunni en ekki nægjanlega mikið til að útrýma vandamálinu samkvæmt Wender og Strauss [10].

Frauðplastseiningar hafa verið notaðar í Noregi í staðinn fyrir vegfyllingar sem berandi grunnur undanfarið 30 ár, sjá mynd 15, þegar hætta er á jarðvegssigi (e. consolidation) út af viðbótar eiginálagi og umferðarálagi [20] [21]. Jarðvegssig er þegar jarðvegurinn sígur rólega yfir tíma vegna aukins lóðréttis álags. Þá pressast vatn út úr jarðveginum og rúmmál jarðvegsins minnkar. Þar sem eiginþyngd frauðplasts er um 50-100 kg/m³ eða um 1/20 af eiginþyngd vegfyllinga þá dregur notkun frauðplastseininga úr lóðréttu viðbótarálaginu og þar af leiðandi einnig úr siginu.



MYND 15 Notkun frauðplastseininga í stað fyllingar vega og undirstaðna. Tölurnar tákna þrýstistyrk eininganna í kPa [20].

Nokkrar rannsóknir [20] [21] hafa verið gerðar á endingu frauðplastseininga í núverandi fyllingum í Noregi. Í rannsóknunum voru 10-35 ára gamlar frauðplastseiningar í vegfyllingum grafnar upp, til að meta styrk eininganna, vatnsdrægni, hrörnun, skrið og endingu eininganna. Niðurstaða rannsókna var að niðurbrot eininganna væri óverulegt, vatnsskemmdir væru óverulegar og þær stæðust ennþá þær styrktarkröfur sem þær voru hannaðar fyrir. Eina veikleikamerkið sem fannst var litabreyting á einingunum. Andersen o.fl. [21] drógu þá ályktun að líftími frauðplastseininganna væri sambærilegur og fyrir vegi og brýr.

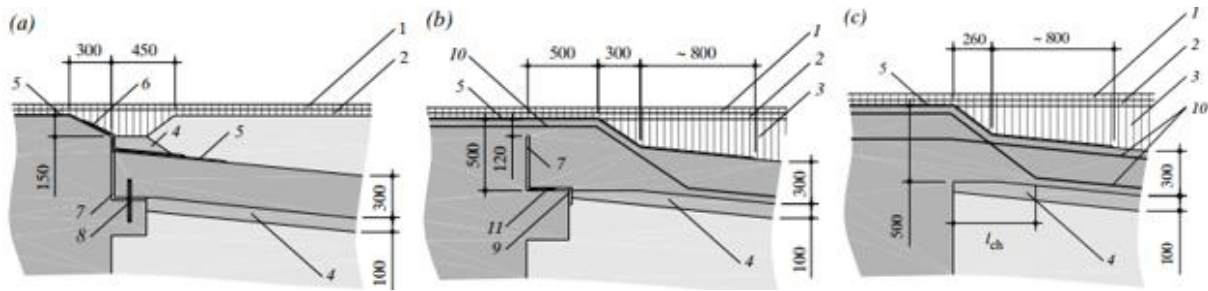
Einu skemmdirnar á frauðplastseiningunum í vegfyllingum samkvæmt Frydenlund og Aabøe [20] hafa verið vegna bruna og flóða. Í tvö skipti hafa flóð sem var stærra en hönnunarviðburðurinn valdið því að lyftikraftar skemma vegfyllinguna og flytja frauðplastseiningarnar í burtu. Í þrjú skipti hefur kviknað í frauðplastseiningunum og í öll skiptin út frá suðuvinnu við stálbita við endastöpulinn.

4.1.3 Hönnun og frágangur sigplötunnar

White o.fl. [8] skilgreina hlutverk sigplötu að lágmarka mismunasig á milli endastöpla og fyllingar. Sigplötunni er því ætlað að draga úr myndun holrýmis fyrir aftan endastöpla og brúa bilið yfir holrýmið sem gæti myndast. Samkvæmt White o.fl. [8] er skilvirkni sigplötu háð mörgum þáttum, þar á meðal stærð og lögun, stífleika (járnabendingu og þykkt), undirstöðu sigplötu og hvernig hún sé tengd við brúarendann.

Nokkrar mismunandi útfærslur tíðkast á tengingu á milli sigplötunnar og endastöpla. Á mynd 16 má sjá nokkrar mismunandi evrópskar aðferðir við tengingu sigplötunnar. Allar lausnirnar leggja áherslu á að gera tenginguna vatnspétta. Samkvæmt Dreier, Burdet og Muttoni [22] er helst orsök dældar við

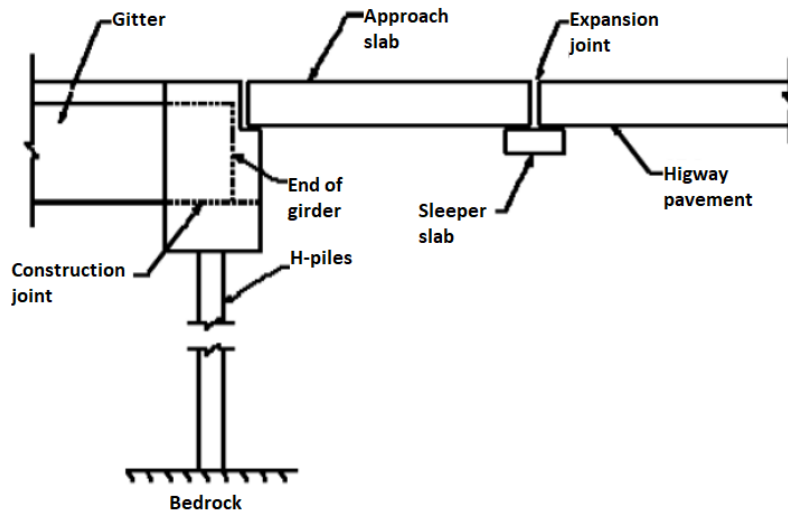
brúarenda snúningur sigplötunnar um tengingarnar á mynd 16(a) og 16(b) þegar brúargólfið dregst saman í kulda á veturna.



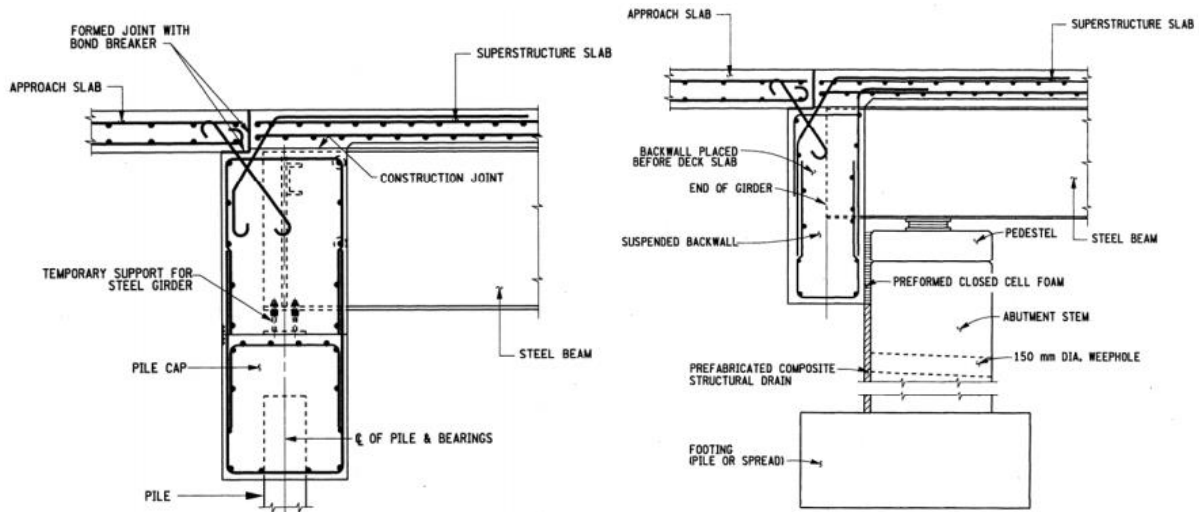
MYND 16 Mismunandi útfærslur frágangs sigplötu við endastöpla. (a) hefbundinn frágangur samkvæmt Graubünden/CH Department of Civil Engineering, (b) samkvæmt Svissneskum reglugerðum og (c) endurbættur frágangur samkvæmt Dreier, Burdet og Muttoni [22]. 1: slitlag; 2 og 3: burðarlög vegbyggingar; 4: undirsteypa; 5: fyrri vatnsvörn; 6: seinni vatnsvörn; 7: biklag (e. bituminous layer); 8: skúfbolti (e. steel stud); 9: frauðplast (e. synthetic foam); 10: tengijárn steypuhluta; 11: slétt biklag (e. sliding bituminous layer). [22]

Kostirnir við útfærslu (a) á mynd 16 eru að vatnsvarnarlagið er varið af steypumassanum og einfalt í smíði. Gallinn er hins vegar sá að skúfboltinn hefur takmarkaða getu til að flytja skerkræfta vegna hreyfinga brúargólfsins í langáttina. Í útfærslu (b), sem er ráðlögð samkvæmt svissneskum reglugerðum, flytja steypustyrktarjárnin kraftana vegna hreyfingar brúargólfsins í langáttina á milli sigplötunnar og brúargólfsins. Útfærslan færir einnig snúningpunkt sigplötunnar ofar og minnkar því líkurnar á dældum í slitlagi við brúarendann. Ókosturinn er hins vegar aukið flækjustig við uppsteypingu þar sem steypustyrktarjárnin þurfa að koma á undan bik-undirlagi (e. bituminous layer). Útfærsla (c) er lögð til af Dreier o.fl. [22] sem betrubót á svissnesku útfærslunni. Útfærslunni er ætlað að auka skerstyrk tengingarinnar, dreifa snúningnum yfir svæðið l_{ch} og einfalda uppsteypingu.

Í Ameríku er hefð fyrir því að hafa sigplötuna flata á yfirborðinu, tengja hana við endabita brúarinnar í annan endann en láta hana hvíla á steyptri plötu (e. sleeper slab) í hinum endanum. Í Ameríku er venjan að sleppa því að setja slitlag ofan á brúargólfið og því brúar sigplatan mismunasigið á aðlægum vegi og undirstöðum brúarinnar ásamt því að brúa holrýmið sem vill myndast við brúarendann. Iðulega er þenslurauf á milli sigplötunnar og slitlagsins og því færir sigplatan aðeins vandamálin tengd þensluraufum fjær endastólpunum, sjá myndir 17 og 18.



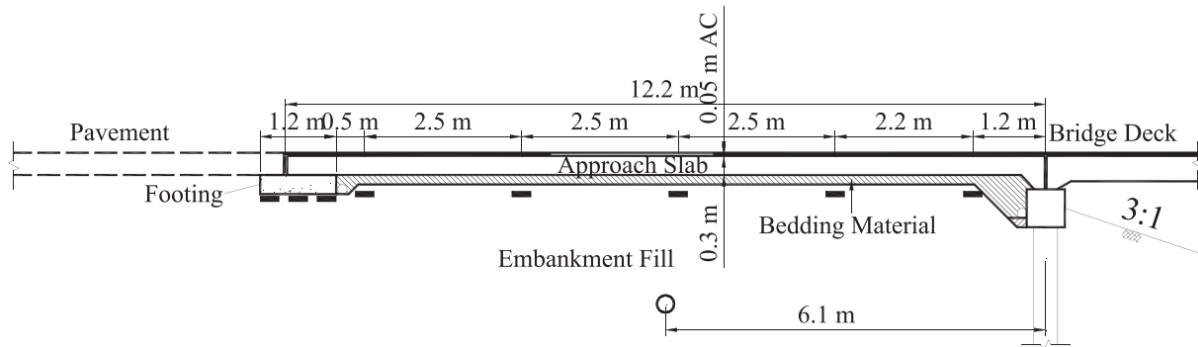
MYND 17 Algeng útfærsla á brúarendum samfelldra brúa í Ameríku, siglattan er lárétt í yfirborðinu og hvílir á endabita brúarinnar öðru megin og steyptri undirstöðu (e. sleeper slab) í hinn endann [23].



MYND 18 Útfærsla tengingar á milli siglötú og endabita í New York fyrir samfelldar og hluta-samfelldar brýr. [24]

Þar sem fyllingin á það til að síga undir siglötunni þá á siglattan það til að missa burð þar sem holrými myndast undir hluta siglötunnar. Nokkrar rannsóknir hafa því verið gerðar á hversu stíf siglattan þurfi að vera til að þola umferðarálagið og hversu löng hún þurfi að vera til að spanna holrýmið sem getur myndast.

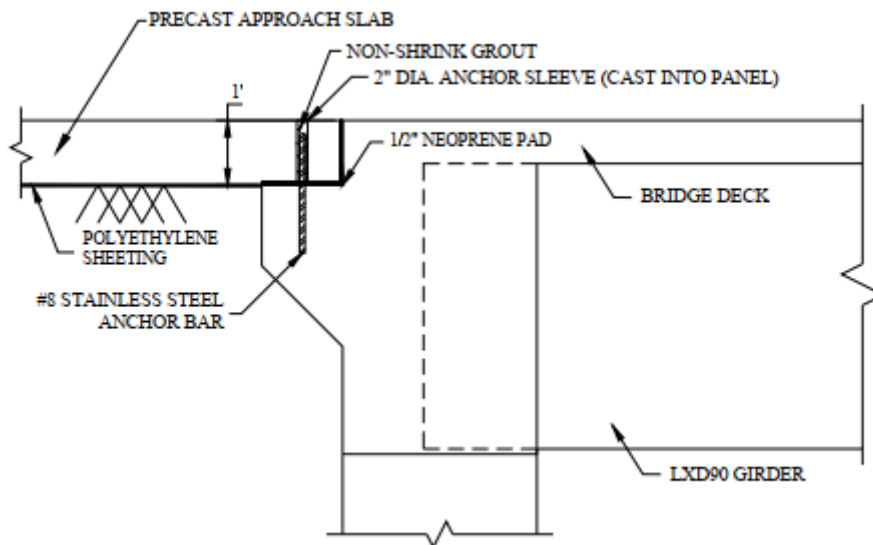
Chen og Abu-Farsakh [25] báru saman í rannsókn sinni dældumyndun í slitlagi, þægindi notenda og jarðvegsþrýsting undir siglötunum þegar tvær mistífar siglötur voru notaðar í sitthvorn enda brúarinnar. Rannsóknin fór fram í Louisiana í Bandaríkjunum og siglöturnar voru við yfirborð fyllingarinnar og hvíldu á endastöpla brúarinnar í annan endann og á steyptri undirstöðu í hinn endann, sjá mynd 19. Stífar siglattan var 400 mm þykk í stað 300 mm og stífnin var einnig aukin með því að stækka járnin í neðri brún úr 19 mm í þvermál yfir í 32 mm í þvermál. Þeir mældu bæði jarðvegsþrýstinginn undir siglötunum þegar 20 tónna trukkur var staðsettur á siglötunum þegar brúin var tilbúin til notkunar og einu og hálfu ári eftir að hún var tekin í notkun.



MYND 19 Frágangur endaplötunnar við annan brúarendann í rannsókn Chen og Abu-Farsakh [25]. Stifari platan var 400 mm þykk en aðrir þættir óbreyttir.

Niðurstöðurnar benda til þess að jarðvegsþrýstingurinn lækkar við brúarendann fyrir stifari sigplötuna í seinni mælingunni. Það bendir til þess að sigplatan sé að missa stuðning frá fyllingunni en beri sig í staðinn á milli steypðu undirstaðanna. Fyrir hefðbundnu sigplötuna eykst hinsvegar jarðvegsþrýstingurinn á milli mælinga sem bendir til þess að sigplatan sé háð jarðvegsstuðningnum til að þola umferðarálagið. Stifari sigplatan var einnig með lægra alþjóðlegt grófleika gildi (e. International Roughness Index, IRI) sem er mælikvarði á þægindi notenda þegar þeir keyra eftir vegum. Lægra gildi þykir betra á IRI skalanum og því reyndist brúarendinn með stifari sigplötu þæginlegri í akstri heldur en hefðbundna sigplatan.

Í rannsókn Greimann o.fl. [26] voru tvær samskonar brýr með mismunandi sigplötum vaktaðar í heilt ár til að bera saman áhrif sigplatna á eiginleika brúa. Önnur brúin var með forsteyptar einingar sem sigplötu en hin var með staðsteyptri sigplötu. Sigplatan var um 23 m löng og 300 mm þykk hjá forsteyptu einingunum og tengdar með skúfbolta við endastöpul brúargólfsins, sjá mynd 20. Staðsteypta sigplatan var eins tengd við endastöpulinn og jafn þykk og forsteyptu einingarnar en hún var í tveimur hlutum, annar hlutinn var 9 m langur með tvöfalda járnabendingu og hinn 6 metra langur með einfaldri járnabendingu. Á milli staðsteyptu hlutanna var þenslurauf.



MYND 20 Frágangur forsteyptu eininganna við endastöpla brúarinnar í rannsókn Greimann o.fl. [26].

Niðurstöður Greimann o.fl. [26] benda til þess að sigplatan hreyfist í takt við brúargólfið. Þeir benda á að tenging sigplötunnar við endastöplana hefur áhrif á hreyfingu endastöplanna og spennudreifinguna í burðarbitum brúargólfsins. Þeir benda á að svörun brúanna er ólík eftir hvor sigplatan er notuð. Ólíka svörunin mældist í vægisáraun platanna, hinsvegar gátu þeir ekki fullyrt hvort það væri tengt tegund sigplatananna eða stærðarmismun. Að lokum benda þeir á að rannsaka þurfi frekar hvort notkun samtengdra sigplatan leysi skemmdirnar í slitlaginu við brúarendann eða hvort skemmdirnar séu einungis færðar frá brúarendanum að þensluraufinni á mörkum sigplötunnar og vegsins, einnig þurfi að rannsaka hvort að þensluraufin á milli sigplötunnar og vegsins valdi öðrum vandamálum.

Út frá athugun White o.fl. [2] á skemmdum á 74 brúm ályktuðu þeir að holrými myndast yfirleitt undir sigplötunni við endastöpla innan við ári eftir að brúin er tekin í notkun út af rýrnun og skriði steypunnar. Þeir ályktuðu að holrýmið nái lengst 1,5 m í burtu frá brúarendanum og því þurfi ekki lengri sigplötu en 3 m til að brúa holrýmið.

4.1.4 Samantekt

Rannsóknir á frágangi brúarenda á samfelldum og hlutasamfelldum brúm má skipta í þrjá meginflokka; gæðakröfur bakfyllingar, notkun frauðplasts við endastöpla og breytta hönnun og frágang sigplatan. Flestar rannsóknir skoða fleiri enn einn flokk samtímis og því getur verið erfitt að staðfesta hvaða þáttur lausnarinnar orsakar bætta svörun brúarenda samfelldra brúa. Rannsóknirnar benda til þess að draga úr skemmdum á yfirborði aðlægs vegar ætti:

- Fyllingin að vera vel þjöppuð og úr einsleitu grófkorna efni til að minnka tímaháð sigfyllingarinnar.
- Jarðvegsstyrkja fyllinguna með jarðvegsdúkum eða með notkun frístandandi frauðplastveggja (EPS einingar) til að koma í veg fyrir að fyllingin sígi niður í holrúm sem myndast þegar brúargólfið dregst saman.
- Nota teygjanlegt frauðplast sem dempara við endabita og/eða við endaveggi til að minnka jarðþrýsting og dældarmyndun við yfirborð vega.
- Sigplatan að vera hönnuð til að brúa holrúm sem er um 1,5 m að lengd.
- Sigplatan að vera skáhallandi fyrir neðan yfirborðið og vera tengd við brúargólfið með samfelldum járnum sem ráða við vægisáraunina eða með skáhallandi járnum við endastöpulinn sem leyfa plötunni að snúast.
- Tenging á milli sigplötunnar og brúarenda á að vera vatnspétt.

Önnur úrræði til að koma í veg fyrir að skemmdir myndist í yfirborði slitlags við brúarenda hafa verið notuð samhliða áður nefndum atriðum í samfelldar brýr sem eru vaktaðar í rannsóknum; til dæmis að hafa tvöfalt lag af malbiki sem hefur þá stærra flatarmál til að taka upp togkraftinn sem myndast þegar brúargólfið dregst saman og að styrkja malbikið með glertrefjanetum til að dreifa sprungunum líkt og er gert í hönnun steyptra mannvirkja [10]. Einnig hafa verið notaðir dúkar eða fínt efni undir sigplötuna til að auðvelda henni að hreyfast í jarðveginum eða sigplatan gerð úr grófu yfirborði til að dreifa álaginu á fyllinguna á stærra svæði.

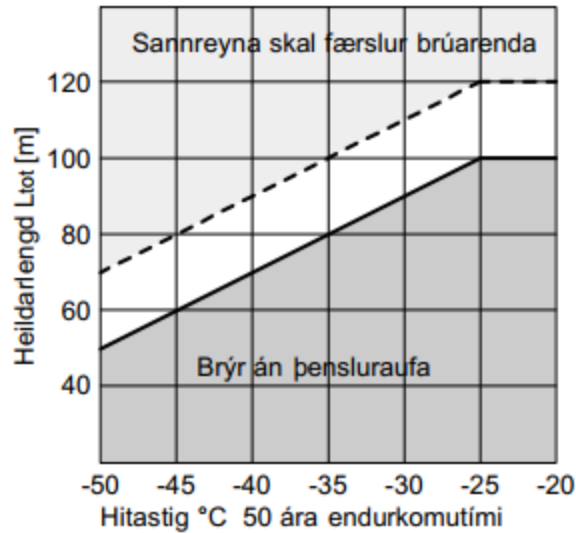
5 STAÐLAR OG REGLUGERÐIR

5.1.1 Íslenskir staðlar og reglugerðir

Íslenska Vegagerðin [5] styðst að miklu leyti við veghandbókina frá Statens vegvesen í Noregi við skilgreiningu reglna um hönnun brúa. Það á að miklu leyti við um hönnun sigplatna. Íslenska Vegagerðin notar sama graf og norska Vegagerðin við skilgreiningu á kröfum á notkun þensluraufa, sjá mynd 21 [5]. Vegagerðin setur kröfu um hámarks lengd brúa fyrir samfelldar brýr eftir hvaða hitabreytingum megi búast við. Að auki setur Vegagerðin eftirfarandi kröfur um form og lögun hlutasamfella vegbrúa með hreyfanlega ásetu í báðum endum, þ.e. yfirbyggingin hreyfist á endastöplum en engar þensluraufar til að taka upp hreyfinguna:

1. Lárétti boginn er $\geq 300 \text{ m}$
2. Skekking (e. skew) í báðum endum brúa er $< 30^\circ$
3. Hæð undirliggjandi veggjar mælt frá neðri brún plötu eða bita að neðri brún undirliggjandi veggja er $\leq 3.0 \text{ m}$
4. Hlutfallið milli meðalhæða undirliggjandi endaveggja sé $\leq 1,1$
5. Hlutfallið milli meðalbreidda undirliggjandi veggja í brúarendum sé $\leq 1,1$
6. Léttar fyllingar eru ekki notaðar í hvorugum enda brúarinnar

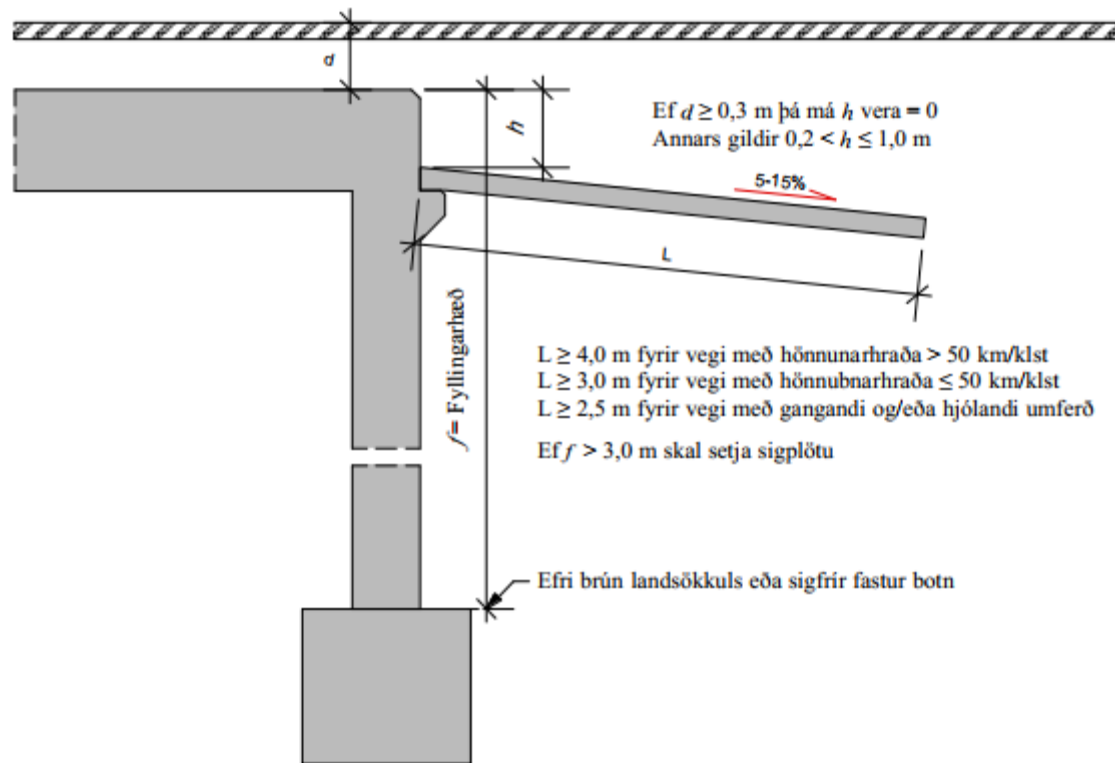
Fyrir vegbrýr með festu í öðrum enda gilda aðeins liðir 1-3, fyrir göngu og hjólabrýr gilda liðir 2-3 ef þær eru með báða enda fasta en liðir 2-6 ef þær eru með báða enda hreyfanlega.



MYND 21 Kröfum um hvenær skuli nota samfelldar brýr og hvenær þurfi að reikna færslur brúarenda til að nota samfelldar brýr [5].

Vegna hættu á sprungumyndun í slitlagi ef að færslur brúarenda verða óhóflegar setur Vegagerðin [5] ráðlögð takmörk á heildarfærslum á brúarendum vegna hitaálags, umferðarálags og vindálags fyrir brýr án þensluraufa með heildarlengd fyrir ofan strikalínuna á mynd 21. Vegagerðin telur ásættanlegt að ef heildarfærslan er undir 25 mm en óásættanleg ef hún er meiri en 50 mm. Á milli 25 mm og 50 mm heildarfærslu er talin mikil hættu á sprungum í slitlagi sem geti skert þægindi vegfaranda og því skuli skoða hvort minnka megi færsluna í brúarendum með breyttri hönnun.

Notkun sigplatna er skylda fyrir brýr án þensluraufa, kröfur um stærð sigplötunnar má sjá á mynd 22 [5]. Lágmarkslengdin er 3 m en auka þarf lengd sigplötunnar að lágmarki um 1 m fyrir brýr án þensluraufa ef að heildarlengd brúarinnar er ≥ 25 m og henni er haldið fastri í báðum endum eða ef heildarlengdin er ≥ 50 m og brúnni er haldið fastri í langáttina fyrir miðju. Ef að slitlag er lagt beint ofan á yfirbygginguna þá skal efri brún sigplötunnar vera 0,2 – 1,0 m neðar en efri brún burðarvirkisins en ef ídráttarrör fyrir lagnir eða strengi er ofan við sigplötuna þá á hæðakrafan við frá efri brún ídráttarrörs. Sigplatan á einnig að vera nógu breið til að ná undir vegaxlir ef það veldur ekki árekstrum við aðra hluti s.s. vegriðsstólpa, ljósamöstur o.fl. Vegagerðin gerir að lokum kröfur um að sigplatan skuli halla 5-15% frá ásetu, sjá mynd 22.

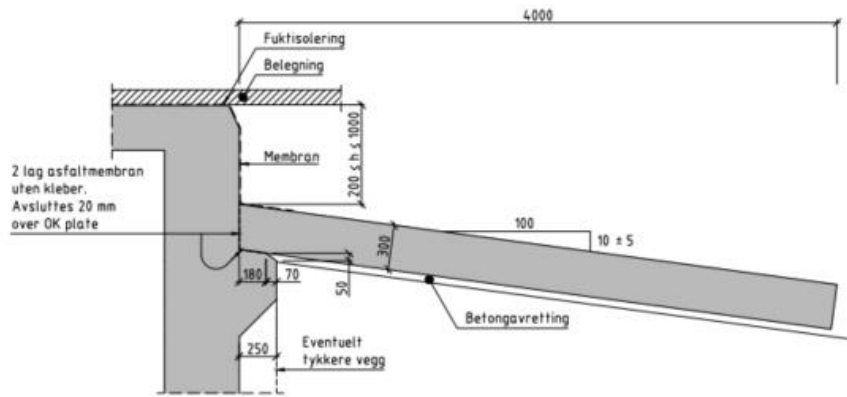


MYND 22 Kröfur um stærð og staðsetningu sigplötunnar við brúarendann [5].

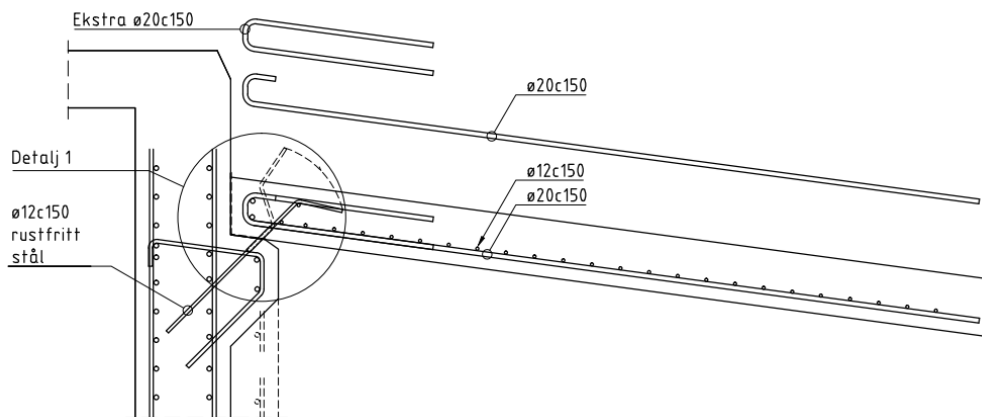
Vegagerðin skilgreinir ekki hvernig frágangur deilis á milli sigplötunnar og sætis skuli háttáð, hvorki hvort sigplatan skuli vera tengd brúarendanum til að tryggja að sigplatan hreyfist með brúarendanum né hvernig vatnspéttni deilisins skuli vera tryggð. Vegagerðin skilgreinir að auki ekkert um hversu vægisstíf sigplatan þurfi að vera (þykkt plötunnar og járnsmágn) eða hvort hún þurfi að vera berandi ef að holrúm skyldi myndast. Vegagerðin [5] tilgreinir aðeins að hún skuli hönnuð fyrir eiginþunga og umferðarálagi skv. álagslíkani 1 í ÍST EN 1991-2 og ef sigplatan er hugsuð fyrir upptöku láréttra krafta skuli hana þeim kröftum og vísar Vegagerðin í leiðbeiningar norsku Vegagerðarinnar [5].

5.1.2 Norskir staðlar og reglugerðir

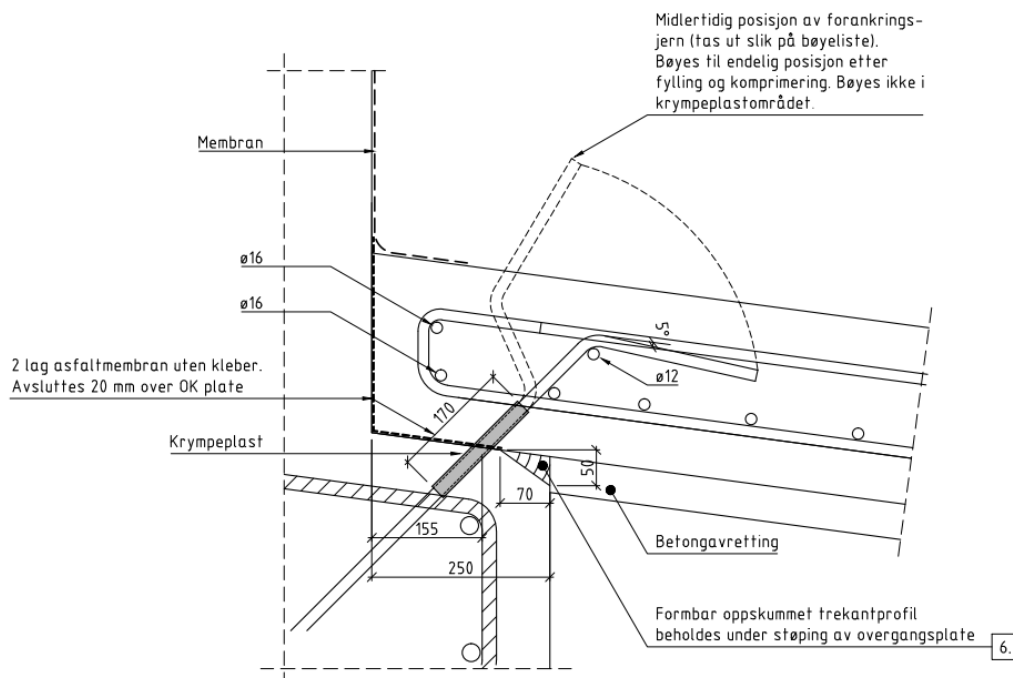
Þar sem íslenski staðallinn byggist að miklu leiti á norskum stöðlum og reglugerðum þá eru kröfur um notkun sigplatna, stærð og lögun hennar eins í báðum stöðlum, sjá mynd 23. Norska vegagerðin birtir hins vegar kröfur um hvernig skuli tengja sigplötur við endastöpla og hvernig frágangi samskeytanna á milli endastöpla og sigplatna skuli háttáð, sjá myndir 24 og 25. Í Noregi er notað skáhallandi ryðfrítt járn á milli endastöplans og sigplötunnar til að tryggja samfellda hreyfingu á milli þeirra. Einnig eru notaðir asfaltdúkar til að gera samskeytin vatnspétt.



MYND 23 Kröfur norsku vegagerðarinnar um stærð og lögun sigplötunnar fyrir vegbrýr [4].



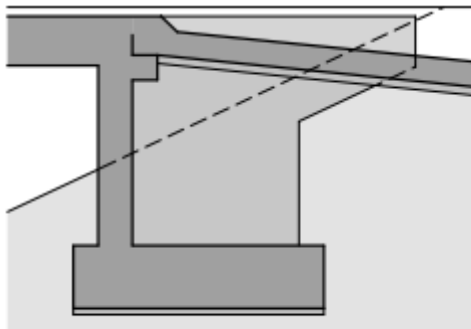
MYND 24 Kröfur norsku vegagerðarinnar um hvernig járnun sigplötunnar og endabitans skuli háttað.



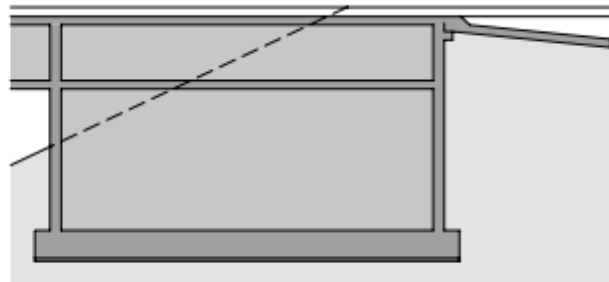
MYND 25 Kröfur norsku vegagerðarinnar um hvernig samskeytum sigplötunnar og endabitans skuli háttað.

5.1.3 Svissneskir staðlar og reglugerðir

Svissneski staðallinn [1] skiptir endafrágangi samfelldra brúa í tvo flokka, sveigjanlegur og stífur brúarendi. Fyrir brýr með mikinn krappa (bogadregnar) mælir staðallinn með að nota stífan endastöpul en sveigjanlega endastöpla fyrir beinar brýr eða brýr með lítinn krappa. Útfærslu á stífum endastöpli má sjá á mynd 26 og á myndum 27 og 28 má sjá útfærslu sveigjanlegs endastöplis fyrir samfelldar og hlutasamfelldar brýr.

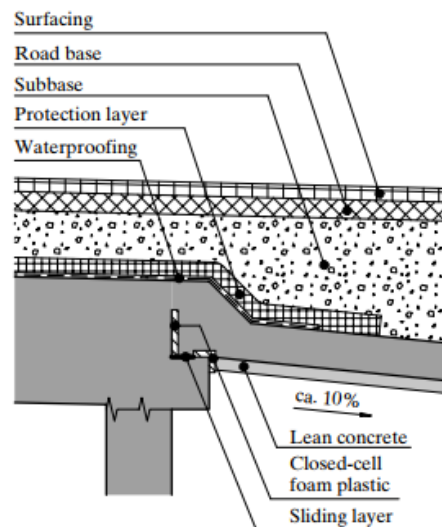
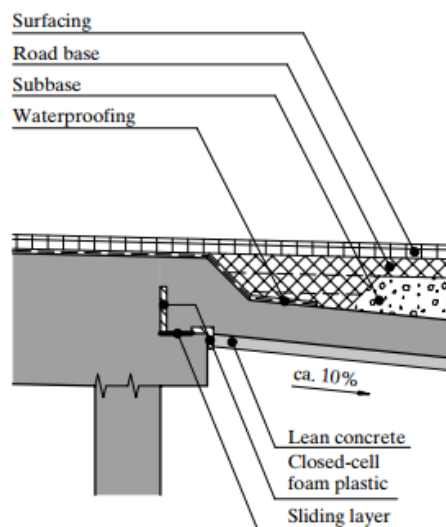


Check force flow in frame corner

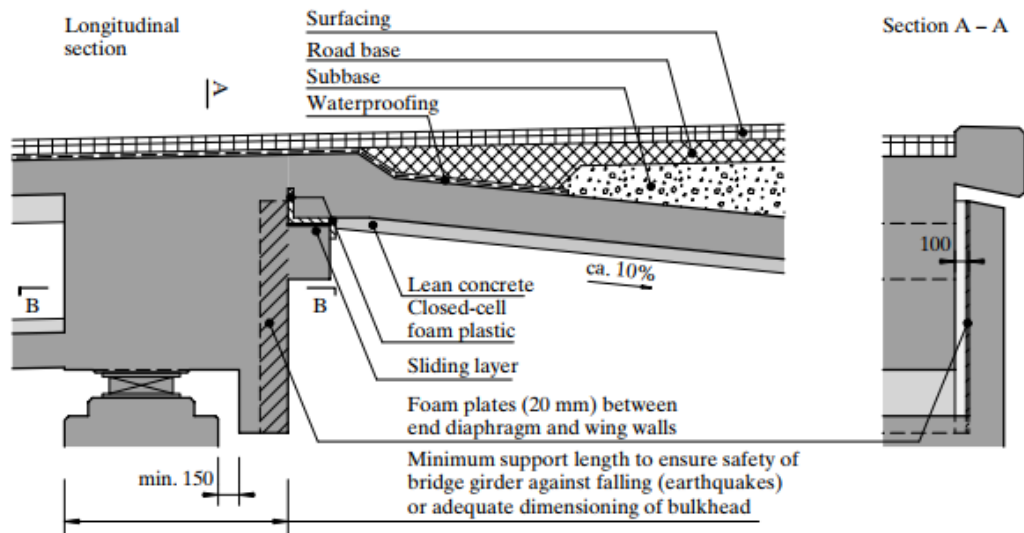


Superstructure "clamped" in abutment

MYND 26 Dæmi um útfærslur á stífum endastöplum fyrir brýr með mikinn krappa, kraftarnir teknir upp í stífu horni eða lokuðum kassa [1].



MYND 27 Frágangur siglötú við endastöpla samfelldra brúa samkvæmt svissneskum stöðlum [1]



MYND 28 Frágangur sveigjanlegs endastöpluls fyrir hluta-samfelldar brýr [1].

Fyrir sveigjanlega endastöpla ráðleggur staðallinn að nota endaveggi með háa renglu en fyrir stífa endastöpla er mælt með stífum vængveggjum samsíða veginum og tengja þá við endastöplana eða hafa stífan ramma til að taka upp færslurnar. Ástæðan fyrir þörfinni á stífri tengingu fyrir bogadregnar brýr er að endastöplarnir vilja snúast um lóðréttan ás vegna láréttra krafta og því er hluti láréttu hreyfinga brúargólfsins tekinn upp sem breyting á krappanum á boganum. Færslurnar verða því minni við brúarendana í langáttina sem gerir það að verkum að hægt er að byggja lengri bogadregnar samfelldar brýr heldur en beinar án þess að vandamál vegna jarðvegs-burðarvirkis verða of ráðandi samkvæmt staðlinum [1].

Svissneski staðallinn frá 1990 mælti með notkun samfelldra brúa upp í 60 m haflengd og hluta-samfelldar brýr upp í 100 m langar [1]. Fyrir lengri brýr ráðlagði staðallinn að skoða notkun samfelldra brúa og að matið átti að byggjast á lífferils kostnaðar greiningu (LCC). Núverandi staðall styðst ekki lengur við lengdarviðmið á brúnni við ákvörðun á frágangi brúarenda heldur við hvaða láréttu færslur megi búast. Matið á láréttu færslunum er byggt á eftirfarandi þáttum [1]:

- Lögur brúarinnar (krappi eða skekkja)
- Hreyfanleg lengd, þ.e. fjarlægð frá föstum punkti
- Burðarkerfi þ.e. hvort lóðréttir kraftar valda láréttum hreyfingum
- Tegund brúargólfs (stál/steypa/samverkandi...)
- Tegund og stífleiki endastöpla
- Jarðvegsskilyrði
- Byggingaröð og byggingartími
- Vægisstífleiki um lóðréttan ás, fyrir brýr með mikinn krappa.

Hámarksfærslan út frá þessum þáttum er fundin, annað hvort út frá mestu færslu (stytting) eftir frágang slitlags eða sem útslag lotubundna færslna fyrir algeng álagstilfelli (e. frequent load cases). Hámarks lárétta færslan samkvæmt Svissneska staðlinum má ekki vera meiri heldur en 20 mm fyrir þjóðvegi (e. high capacity motorways) og 30 mm fyrir aðra vegi.

Þar sem kröfurnar eru háðar færslum brúarendanna en ekki heildarlengd brúarinnar auka kröfurnar sveigjanleikann við notkun samfelldra eða hluta-samfelldra brúa. Til dæmis er algengt í Sviss að þegar gamlar steyphtar brýr eru endurgerðar þá sé þensluraufin fjarlægð en legan látin standa þ.e.a.s. mest öll rýrnun og skrið steypunnar er þegar komið fram [1]. Byggingahraðinn og byggingaröðin getur líka haft sitt að segja ef steypa er látin standa í einhvern tíma áður en slitlagið er sett á þ.e.a.s. skrið og rýrnun steypunnar er mest í byrjun. Kröfurnar gera það einnig að verkum að hægt er að byggja lengri samverkandi brýr heldur en eftirspenntar steyphtar brýr vegna skriðs og rýrnunar í steypunni.

5.1.4 Breskur hönnunarstaðall

Breski staðallinn setur kröfur um hámarks færslu endastöpla á samfelldum brúm frekar en hámarks lengd samfelldra brúa líkt og Svissneski staðallinn. Breski staðallinn setur kröfu um að færslur brúarinnar í langáttina skuli vera minni en ± 20 mm, yfir 120 ára hönnunartíma brúarinnar, miðað við staðsetningu endastöplanna þegar þeir eru skorðaðir af [27]. Staðallinn tilgreinir að þegar færslurnar eru reiknaðar skal taka tillit til hitabreytinga ásamt skriðs og rýrnunar steypu.

Staðallinn ræður gegn því að nota þensluraufar á milli hafa fyrir margra hafa samfelldar brýr [27]. Staðallinn ráðleggur frekar að þversnið brúargólfsins ráði við að taka upp áslægu kraftana sem myndast vegna hitabreytinga og að láréttu kraftana skuli taka upp í gegnum undirstöður, með jarðvegsþrýstingi eða viðnámi. Einnig geti þurft að huga að togkröftum sem geta myndast í endastöplum og fyllingum þegar brúargólfið dregst saman.

Til að auðvelda brúargólfinu að hreyfast ráðleggur staðallinn að hafa vængveggi eins litla og hægt er til að brúin þurfi að hreyfa sem minnstan jarðveg við hitaþenslur [27]. Ef stórir vængveggir eru notaðir skal tryggja að endastöplar geti vaggast eða runnið til hliðanna óháð vængveggjunum.

Staðallinn [27] setur kröfu um að fyllingar við bakveggi skuli þjappa og vera úr sjálf drenandi granular fyllingarefni og uppfylli ákveðnar gæðakröfur (flokkar 6N eða 6P skv. breskum stöðlum). Fyllingarefnið með auknar gæðakröfur skal nota í fláa með allavega 45° halla bakvið endastöpla. Staðallinn ráðleggur einnig að hafa skerhorn (ϕ) fyllingarinnar ekki stærra 45° fyrir samfelldar brýr með heildarlengd meiri en 40 m þar sem skerhornið hefur áhrif á hversu hreyfanleg fyllingin sé og hversu miklir kraftar myndast. Ef stærra skerhorn er valið þá minnkar hreyfanleiki fyllingarinnar og þar af leiðandi brúargólfsins en kraftarnir í fyllingunni verða stærri í staðinn.

5.1.5 Bandarískar leiðbeiningar

Í Bandaríkjunum eru ekki til leiðbeiningar frá AASHTO um hvernig skuli hanna sigplötur [26]. Í staðinn er hvert fylki með sínar leiðbeiningar um hvort það eigi að nota sigplötu og ef svo er, hversu stór hún eigi að vera og hvernig eigi að ganga frá henni. Hoppe [12] rannsakaði notkun sigplatna í brúargerð í bandaríkjunum með því að senda könnun á vegagerðir 48 fylkja og þar af svöruðu 39 fylki.

Í könnun Hoppe [12] kom í ljós að flest öll fylkin noti sigplötur samsíða brúargólfinu í samfelldar brýr en sum fylki leyfa að sleppa þeim ef búist er við litlu jarðvegssigi eða ef vegurinn er í lágum þjónustuflokki. Hins vegar var lengd og útfærsla sigplötunnar mjög ólík á milli fylkja. Algengasta lengdin á sigplötunni var 6,1 m (20 ft.) og 300 mm (12 in.) þykk, en dreifingin var frá 3 m löngum upp í 12.2 m

lengd og frá 200 mm þykkri sigplötu upp í 430 mm þykka. Tenging sigplatnanna var mjög mismunandi en algengast var að nota skúfbolta á milli endastöplanna og sigplatnanna. Næst algengast var að láta lárétt járn ganga á milli steypu hluta brúargólfsins og sigplötunnar en fæstir höfðu plötuna alveg lausa.

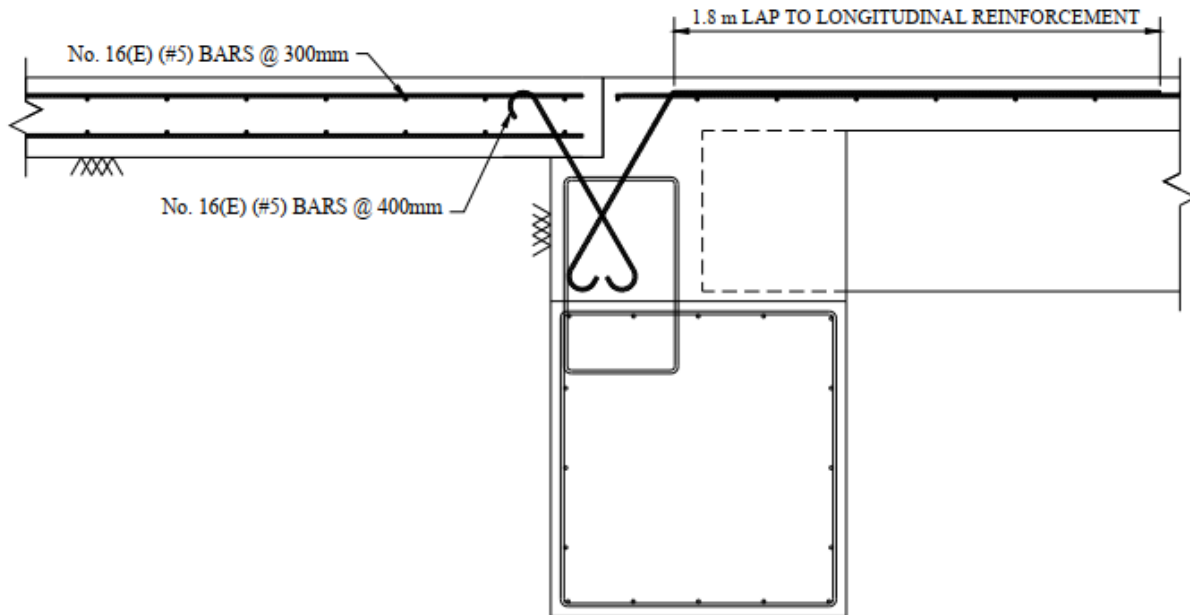
Fylkin gerðu almennt meiri kröfur til fyllingarinnar undir sigplötum heldur en til almennrar vegfyllingar. Hertu kröfurnar fólust í því að takmarka magn fínefna í fyllingunni (75 micron eða minni korn) og að fyllingin skuli vera lögð út í 200 mm lögum og þjöppuð þess á milli.

Einungis eitt fylki var með sigplötuna niðurgrafna og skáhallandi eins og er algengt í Evrópu, öll hin fylkin voru með sigplötuna lárétta í yfirborðinu, hvílandi á steyptri undirstöðu í hinn endann. Hoppe [12] bendir hins vegar á að með því að hafa sigplötuna niðurgrafna og skáhallandi þá sé auðveldara að lagfæra slitlag vegsins við brúarendann ásamt því að sigplatan verji betur brúarendann gegn vatnsáreiti þ.e.a.s. sigplata beinir vatninu í burtu frá endastöplanum.

Hoppe [12] skoðaði einnig hversu mikið sigið mætti vera til að það hafi ekki neikvæð áhrif á upplifun notenda. Niðurstöður hans benda til að breytingin á veghallanum má ekki vera meiri en 1/200 án þess að notendur finna fyrir því og ef breytingin er orðin meiri en 1/125 þá sé orðin þörf á viðgerðum. Hoppe benti á að ef búist er við miklu sigi á fyllingunni megi byrja með fyllinguna aðeins hærri eða sem um nemur 1/200 og þá þurfi seinna að fara í miklar viðgerðir. Hoppe [12] ályktaði út frá rannsókninni að lengd sigplötunnar ætti að ráðast af því hversu miklu mismunasigi sé búist við á milli endastöpla brúarinnar og aðlæga vegsins.

Greimann o.fl. [26] tóku saman útfærslu tenginga á milli sigplötu og endabita brúa í 10 fylkjum í Bandaríkjunum og hverjar væru helstu breytingarnar á deilunum undanfarið og af hverju þær breytingar hefðu verið gerðar. Rannsóknin gefur til kynna að það sé að verða algengara að tengja sigplötuna við brúargólfið. Ástæður fyrir tengingunni er til að forðast raufina sem myndast á milli sigplötunnar og brúargólfsins. Svarendur sögðu að raufin stuðli að vatnsskemmdum og að drulla eigi það til að safnast fyrir í raufinni sem veldur því að raufin stækki með tímanum þegar brúargólfið hreyfist út af hitabreytingum. Svarendur töldu einnig hættu á því að sigplatan detti af ásetunni á endanum út af hreyfingunum.

Flest fylkin byrjuðu á því að tengja sigplötuna við brúargólfið með því að láta lárétt járn ganga á milli brúargólfsins og sigplötunnar en það olli sprungum þvert á sigplötuna og í enda brúargólfsins. Ástæðan fyrir sprungunum var talin vera að járnin leyfa ekki snúning á sigplötunni þegar að fyllingin sígur sem orsakar mikla vægisáraun á bæði sigplötuna og enda brúargólfsins. Nýjasta breytingin sem sum fylki hafa tekið upp er að tengja járn skáhallt frá endastöplinum upp í sigplötuna með krók á endanum, sjá mynd 29. Þá færast sigplatan með endastöplinum og leysir vandamálið við raufina en járnin leyfir sigplötunni að snúast og minnkar því sprungumyndun í sigplötunni og enda brúargólfsins. Einnig hafa sum fylki fært langjárnin neðar í sigplötuna og skeytt þeim saman við steypuskilin til að auðvelda uppsteypu. Einnig hafa mörg fylki byrjað að nota viðnámslítið efni, t.d. polyethylene eða dúka undir sigplötuna til að auðvelda henni að hreyfast.



MYND 29 Frágangur tengingar á milli sigplötu og brúarenda í New York fylki. Notkun skáhallandi króks á milli endastöpla og sigplötu er að aukast í vinsældum [26]

5.1.6 Samantekt

Íslenska Vegagerðin [5] setur kröfu um að nota samfelldar brýr ef þær eru stuttar (<50 m) og búist er við litlum hitabreytingum. Fyrir lengri brýr þarf að sannreyna að færslur brúarendanna sé undir viðmiðum (25 mm) og hámarki (50 mm) Vegagerðarinnar til að nota megi samfelldar brýr. Bæði svissneski og breski staðallinn miða aðeins við færslur brúarendans við takmarkanir á lengdum samfelldra brúa.

Flest allir staðlarnir sem voru skoðaðir skilyrða notkun sigplatna fyrir samfelldar eða hlutasamfelldar brýr og að tengja hana við brúargólfið eða endabita brúargólfsins. Aðeins nokkur fylki í Bandaríkjunum leyfa að sleppa sigplötunni. Misjafnt er hins vegar hvort og hvernig tenging sigplötunnar skuli háttáð ásamt hvaða stærð og lögum sigplatan skuli hafa.

Í Ameríku er venjan að hafa sigplöturnar í beinu framhaldi af brúargólfinu, þ.e. á yfirborðinu, en víða í Evrópu er venjan að hafa þær skáhallandi niðurávið, tengdar í brúargólfið fyrir neðan yfirborðið. Nokkur fylki í Bandaríkjunum hafa færst frá því að hafa sigplöturnar á yfirborðinu yfir í að hafa þær skáhallandi og aðeins fyrir neðan yfirborðið.

Algeng stærð á sigplötum miðað við staðlana og reglugerðirnar sem voru skoðaðar eru 3 - 6 m langar og um 200 – 300 mm á þykktina. Tenging sigplötunnar við endastöplana virðist vera að færast frá því að nota skúfbolta og yfir í að láta ryðfrí járn ganga beint úr brúargólfinu yfir í sigplötuna eða skáhalt úr endastöplinum í sigplötuna.

6 SKAUDALBRÚ Í NOREGI

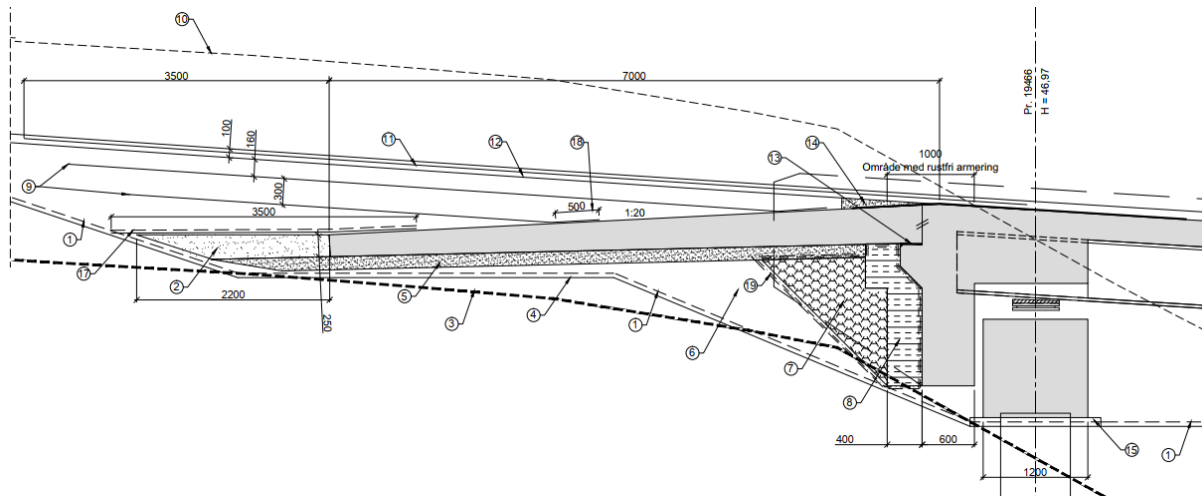
Skaudalbrúin í Noregi er 90 m löng í þremur mismörgum höfum og er staðsett í mið-Noregi, sjá mynd 30. Brúargólfið er 11,6 m á breiddina og burðarvirki hennar er samverkandi stálbitar og steyp brúargólf. Brúin var tekin í notkun árið 2015 og var 1 ár í smíðum.



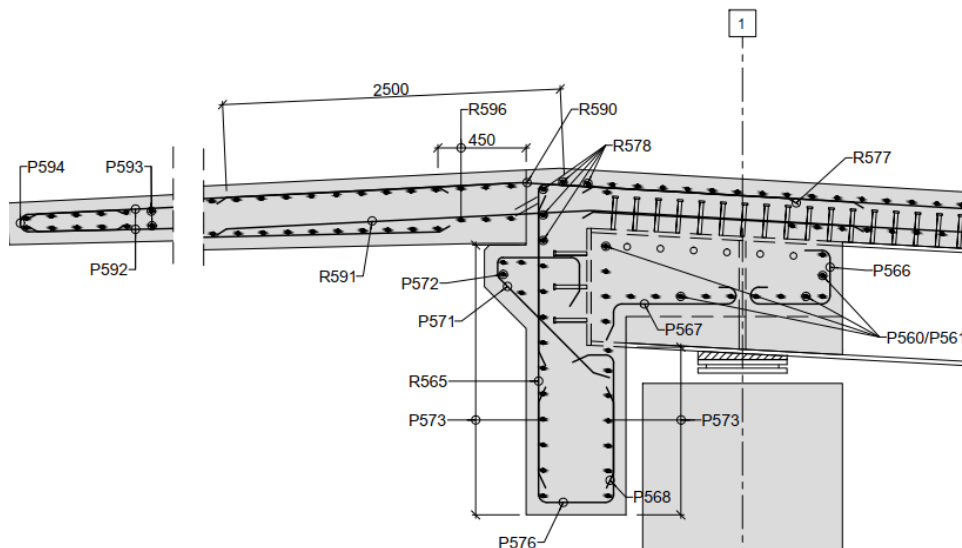
MYND 30 Skaudal brúin í Noregi, horft til norðurs.

Brúin er hlutasamfelld þannig að brúargólfið, endabiti og sigplöturnar hreyfast sem ein heild en brúargólfið er slitið frá endastöplunum með legu og brúargólfið hreyfist því óháð endastöplum, sjá mynd 31. Notaðar voru sigplötur við brúarendana til að draga úr mismunasigi og draga úr dældarmyndun á yfirborði slitlagsins. Sigplöturnar voru tengdar efst í endabita brúargólfsins og látnar halla niður á við. Sigplöturnar eru með breytilega þykkt og þynnast út frá brúargólfinu frá 450 mm niður í 250 mm. Sigplöturnar eru einnig mislangar, við norður endann er hún 5 m löng en hún er 7 m löng við suður endann. Vegna kvikleirs við syðri enda brúarinnar var gröftur takmarkaður og því er siglattan við suður enda brúarinnar flatari en lengri í staðinn. Endar siglattananna eru því álíka langt frá yfirborði

slitlagsins sem stuðlar að jafnara álagi á yfirborð slitlagsins. Á mynd 32 má sjá hvernig siglplatan er tengd við brúargólfið með ryðfríum langjárnnum sem ganga samfelt á milli steypuskilanna. Siglplöturnar hreyfist því í takt með brúargólfinu og komið er í veg fyrir að rauf myndist á milli brúargólfsins og siglplöturnar.



MYND 31 Frágangur brúarenda á Skaudalbrú í Noregi, suðurendi.



MYND 32 Járnun siglplötunnar, endabitans og samskeytin á milli í Skaudalbrú í Noregi, suðurendi.

Teygjanlegt frauðplast (e. Elasticized EPS) með fjaðurstuðullinn $E = 200 - 300 \text{ kN/m}^2$ var notað bakvið endabitann og við vængveggi. Teygjanlega frauðplastið er 400 mm þykk og með minnst 10% samþjöppun, sjá mynd 31. Fyrir aftan teygjanlega frauðplastið voru notaðar frauðplastseiningar, samkvæmt kröfum Norsku veghandbókinni nr. 018 [28], til að búa til frístandandi veggfláa, og einnig til að mýkja yfirganginn yfir í hinn viðkvæma kvikleir. Notkun frauðplastsins er í samræmi við rannsóknir erlendis á notkun frauðplasts til að taka upp hitabreytingar í brúargólfinu, sjá kafla 4.1.2.

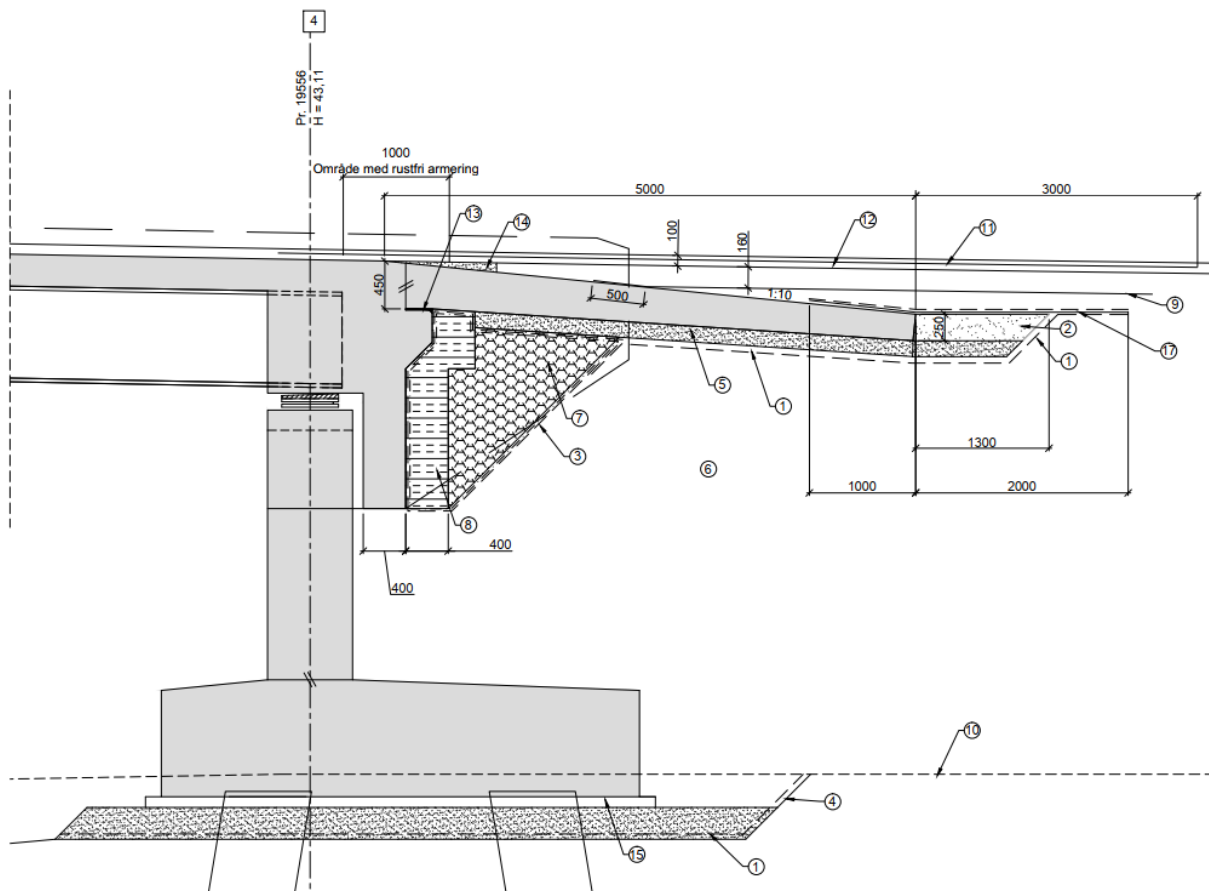
Í bakfyllinguna var notuð fylling úr sprengdu grjóti með kornadreifingu á bilinu 22-120 mm. Fyllingin var lögð út í 300 mm þykkum lögum og þjöppuð með 1,5 tonna valta án titrings. Ekki var hægt að nota titring við þjöppun fyllingarinnar vegna kvikleirsins. Eftirlit var með gæðum þjöppunar og sigi á fyllingunni.

Sérstök fylling var notuð við enda siglplattanna sem náði um 2 m út frá siglötunum og var 250 mm þykk, eða jafn þykk og endar siglplattanna. Fyllingin var úr afrúnnuðu einsleitu efni með kornastærð á bilinu 4-8 mm. Tilgangur fyllingarinnar var að auðvelda hreyfingar siglötunnar vegna hitabreytinga. Yfir þessa fyllingu var sett hástyrkleika pólýester dúkur, sem er tvíátta ofinn, með lágmarks togstyrk upp á 150 kN/m. Dúkurinn var látinn skarast á milli fyllingarinnar og siglötunnar, sjá mynd 31.

Fyrir ofan siglötunnar voru lagðir tvö jarðvegsstyrkjandi net. Netin voru úr pólýprópýlen „fasthnúta“ neti með lágmarkstogstyrk upp á 30 kN/m og með lágmarks lengingu vegna hámarks álags upp á 10%. Möskvastærð netsins var 60-70 mm og var lagt ofan á siglötuna. Netin voru lögð í neðri hluta burðarlags og neðri hluta styrkingarlags.

Að lokum var malbikið lagt í tveimur 50 mm þykkum lögum og á milli laganna var lögð malbiksstyrking úr glertrefjaneti með lágmarkstogstyrk upp á 100 kN/m, möskvastærðina 30x30 mm og flotstreitu upp á $\epsilon = 2\%$. Glerrefjanetið var látið ná meter inn á brúargólfið og 3,5 m út fyrir siglötuna. Glerrefjanetinu er ætlað að dreifa sprungumynduninni í slitlaginu og í staðinn fyrir stakar stórar sprungur þá myndast margar litlar.

Frágangur brúarendans við nyrðri enda brúarinnar var sambærilegur við syðri endann en þar sem kvikleirinn var ekki til staðar þá var endastöpullinn grundaður á veggfæti í stað staura og því var notað meira af grófri fyllingu, sjá mynd 33. Siglattan var einnig höfð styttri en brattari, eins og áður hefur komið fram, og aðeins var notaður einn jarðvegsdúkur í stað tveggja ofan við siglötuna.



MYND 33 Frágangur brúarenda á Skaudalbrú í Noregi, norðurendi.

Lausnin á endafrágangi brúarinnar er í samræmi við ráðleggingar rannsóknanna í kafla 4. Lausnin notar frauðplast við endabita brúarinnar til að taka upp hitapenslur brúargólfsins og notar frauðplastseiningar við myndun frístandandi fláa í vegfyllingu gegn samdrætti brúargólfsins. Brúin notar einnig grófkornótta og vel þjappaða fyllingu undir sigplöturnar og finni fyllingu við enda sigplátnanna sem dregur úr mismunasi, hjálpar til með afvötnun fyllingarinnar og eykur hreyfanleika sigplötunnar. Jarðvegsstyrking er notuð ofan við sigplöturnar til að draga úr mögulegri dældarmyndun við enda sigplátnanna vegna hitabreytinga, ásamt því að nota glertrefjanet til að styrkja malbikið þ.a. það þolir meiri formbreytingar og dreifi sprungunum í malbikinu.

Reynsla lausnarinnar við brúarendann þykir mjög góð. Engar sjáanlegar sprungur hafa myndast við brúarendana og vegfarendur hafa haft orð á því að brúin sé þægileg og mjúk yfirferðar m.t.t. dældarmyndunar við brúarenda. Á myndum 34 og 35 má sjá ástand vegyfirborðsins við brúarendana í mars 2020.



MYND 34 Ástand vegyfirborðsins við syðri enda Skaudal brúnnar, mynd tekin í mars 2020.



MYND 35 Ástand vegfirborðsins við nyrðri enda Skaudal brúnnar, mynd tekin í mars 2020.

7 BÆTTUR FRÁGANGUR BRÚARENDA FYRIR SAMFELLDAR BRÝR

Frágangur brúarenda á Íslandi er að mörgu leyti mjög frambærilegur, Vegagerðin setur ýmsar góðar kröfur eins og að nota sigplötur í samfelldar brýr, gæðakröfur til fyllingarinnar og að fyllingin sé þjöppuð við útlögn. Þrátt fyrir kröfur Vegagerðarinnar kom fram í rannsókn Gylfa og Helga [3] að yfirborð vega við langar samfelldar brýr á Íslandi þyrftu tíðara viðhald heldur en aðrir hlutar vega.

Byggt á samantektinni á erlendum rannsóknum, erlendum stöðlum og reynslu EFLU af frágangi brúarenda samfelldra brúa eru nokkrar úrbætur á frágangi brúarenda á Íslandi lagðar til. Úrbæturnar fela í sér að:

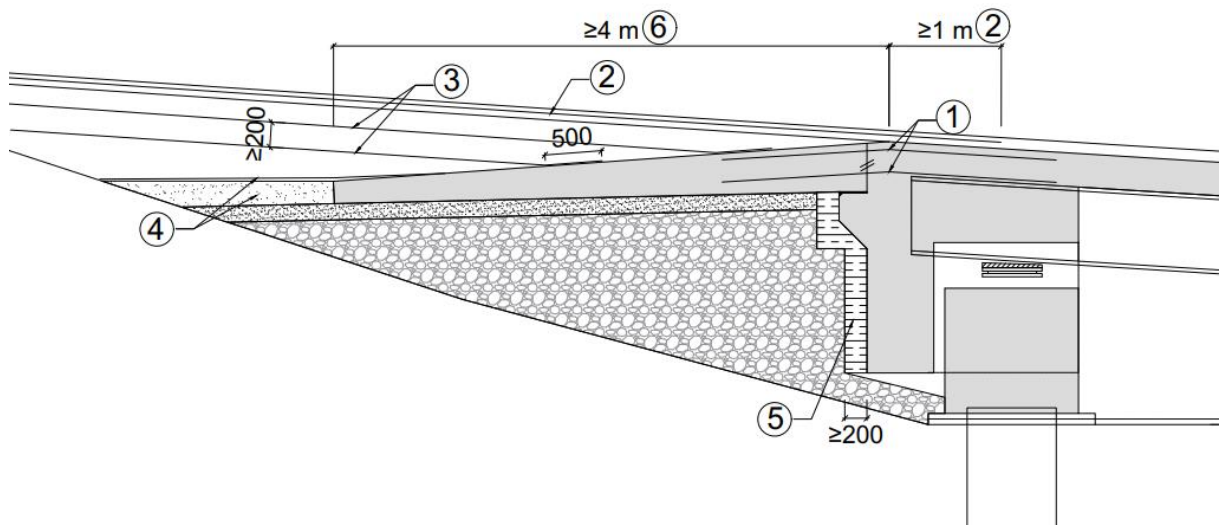
1. Tengja sigplötuna við endabita brúargólfsins með ryðfrírri járnun.
2. Notað styrktarnet í malbiki yfir yfirganginum.
3. Notað jarðvegsdúka til að styrkja fyllinguna ofan við sigplötu.
4. Notað fyllingu úr rúnnuðu 4-8 mm efni við sigplötuenda og hástyrkleikadúk ofan á fyllinguna.
5. Notað mjúkt frauðplast bakvið endabita undir sigplötu
6. Notað lengda sigplötu, ≥ 4 m, sem grennist út frá brúarendanum og sem getur borið sig yfir 2 m holrými.

Á mynd 36 má sjá hvernig endurbæturnar gætu litið út fyrir hlutasamfelldan brúarenda með malbikuðu yfirborði. Í tillögunni er lagt til að sigplatan sé skáhallandi út frá yfirborðinu og sé tengd við brúargólfið með láréttum ryðfríum járnnum líkt og í Skaudalbrúnni. Lagt er til að malbikið sé styrkt með styrktarneti, t.d. glertrefjaneti sem nær allavega 1 m inn á brúargólfið og til að koma styrktarnetinu fyrir þurfi a.m.k. 2x 40 mm þykkt malbik.

Lagt er til að nota tvö lög af jarðvegsdúkum ofan við sigplötuna sem séu tengd í sigplötuna og með allavega 200 mm lóðréttu millibili. Lengd og halli sigplötunnar ætti að ráðast af veghallanum og aðstæðum til að koma jarðvegsdúkunum og fyllingunni ofan við sigplötunni fyrir. Fyllingin úr rúnnuðu 4-8 mm efni við sigplötuendann ætti að vera jafn þykk og sigplötuendinn og allavega 2 m á lengd. Hástyrkleikadúkurinn ofan á fyllingunni ætti að ná allavega 1 m inn á sigplötuna.

Þykkt frauðplastsins við bakvegg endabita brúarinnar myndi ráðast af því hversu miklar láréttar hreyfingar frauðplastið þarf að geta tekið upp. Lagt er til að lágmarksþykktin á frauðplastinu yrði 200 mm en hanna þyrfti þykkt frauðplastsins þ.a. það fari ekki á flöt við hámarksfærslur brúarendanna.

Hæð frauðplastsins ætti að ráðast af hæð hreyfanlega hluta brúarendans, þ.e. frauðplastið ætti að vera bakvið endabita hlutasamfelldra brúa en ná niður allan endavegginn á samfelldum brúm.



MYND 36 Tillagan að bættum endafrágangi felur í sér 1) tengingu sigplötunnar við brúargólf með ryðfríum járnnum, 2) styrkingu malbiks með neti, 3) jarðvegisdúka ofan við sigplötu, 4) fínt fyllingarefni við enda sigplötunnar, 5) frauðplast við endabita brúarinnar og 6) nota lengda sigplötu sem þynnist út frá brúarendanum. Einingar í mm.

Lausnin sem er lögð til tekur aðeins fyrir frágang á hlutasamfelldum brúarendum þegar yfirborð vegarins er malbikað en ekki þegar það er klætt. Fyrir samfellda brúarenda með malbiki er lögð til sama lausn nema frauðplastið látið ná niður allan endavegginn eins og áður hefur komið fram.

Við mat á árangri af endurbótum á endafrágangi þyrfti að tvískipta niðurstöðunum eftir yfirborði brúarinnar. Til dæmis þyrfti að skoða hvort þörf sé á að tengja sigplötuna neðar í brúarendann þegar klæðing er á veginum til að koma fyrir undirlagi fyrir klæðinguna næst brúarendanum. Eins mætti hugsa sér að tengja hreyfingu klæðingarinnar við hreyfingu brúargólfsins með því að tengja dúk í undirlaginu við endabita brúarinnar. Þetta verður tekið til skoðunar í næsta áfanga verkefnis þessa.

Til að meta notagildi endurbætta brúarendans sem hefur verið kynntur er lagt til að velja í samráði við Vegagerðina brýr sem er fyrirhugað að byggja og aðlaga endafrágangslausnina að hönnun brúnna sem til prófunar eru. Til samanburðar verði valdar brýr sem eru að fara í rekstur eða eru alveg nýkomnar í rekstur og hafa svipuð kennigildi og fyrirhuguðu brýrnar, en eru með hefðbundinn endafrágang.

Gert er ráð fyrir að verkefninu verði fylgt eftir með vöktunaráætlun sem miðar að því að sýna fram á að nýr frágangur sé betri en núverandi aðferðir m.t.t. vegaskemmda við brúarenda. Vöktunaráætlunin mun m.a. byggjast á að mæla styttingu/lengingu brúar tvisvar á ári, sig og sprungur vegyfirborðs næst brú og hitastig þegar mælingin fór fram. Einnig er gert ráð fyrir að reynsla verktaka við að vinna útfærðan frágang verði skráð svo að reynslan geti nýst í öðrum verkefnum.

8 LOKAORÐ

Samfelldar og hlutasamfelldar brýr hafa orðið vinsælli undanfarin ár vegna kostnaðarsamra og viðhaldsfrekra þensluraufa [1]. Samfelldar eða hlutasamfelldar brýr eru þó ekki lausar við vandamál vegna lengdabreytinga brúargólfsins heldur hafa vandamálin aðeins breyst yfir í vandamál á milli samspils burðavirkis og jarðvegs í stað staðbundinna vandamála þensluraufa. Vandamálin birtast helst sem skemmdir í yfirborði slitlagi á aðliggjandi vegi og sem vatnsskemmdir á burðarvirki. Skemmdir í yfirborði slitlagsins eru helst raknar til hitaþensla brúargólfsins, myndunar holrúms fyrir aftan endastöplann og ófullnægjandi hönnunar á sigplötu.

Þróun í hönnun frágangs brúarenda við samfelldar- og hlutasamfelldarbrýr hefur verið hröð undanfarið vegna aukinnar reynslu og rannsókna á samspili burðarvirkis og jarðvegs samfelldra brúa. Flestar rannsóknir benda til þess að notkun sigplatna dragi úr mismunasigi við brúarenda samfelldra brúa og hlutverk þeirra sé m.a. að brúa holrúm sem getur myndast við endabita brúargólfsins vegna lotubundna hitabreytinga [2] [8] [25]. Lögum og tenging sigplötunnar er hins vegar mjög mismunandi á milli landa en nýlegar rannsóknir benda til þess að betra sé að hafa sigplötuna skáhallandi niður á við og að tengja sigplöturnar við brúargólfið til að tryggja að sigplöturnar hreyfist í takt við brúargólfið [26].

Rannsóknir á notkun teygjanlegs frauðplasts (e. Expanded Polystyrene, EPS) bakvið endastöpla [15] benda til þess að það dragi úr jarðvegsþrýstingi, minnki sig fyllingarinnar og dragi úr dældarmynduninni á yfirborði slitlagsins. Einnig hefur notkun á jarðvegsstyrkingu samhliða notkun frauðplasts reynst vel við að draga úr myndun dældar á yfirborði slitlagsins [6] [19].

EFLA hannaði hlutasamfellda brú í Noregi árið 2014 út frá nýlegum rannsóknum. EFLA studdist við notkun frauðplasts, jarðvegsstyrkingar og glertrefjanet til styrktar malbiksins við hönnun brúarenda brúarinnar. Reynsla brúarinnar þykir mjög góð og ekki hefur þurft að laga dældir í slitlaginu við enda brúarinnar síðan hún var tekin í notkun fyrir 5 árum síðan en fyrstu árin þykja yfirleitt viðhaldsfrekust á meðan steypa er að skríða og rýrna.

Nýtt deili á frágangi sigplatna fyrir hlutasamfelldar brýr með malbiki sem byggist á erlendu rannsóknunum, stöðlunum og reynslu EFLU á frágangi brúarenda samfelldra brúa hefur verið kynntur. Frágangurinn byggist m.a. á notkun frauðplasts við endabita brúa, hafa sigplötuna tengda við brúargólfið með ryðfríum járnum og hafa hana skáhallandi niður á við frá enda brúargólfsins, nota jarðvegsdúka til styrktar fyllingarinnar og styrkja malbikið við yfirgang samfelldra brúa. Nýja deilið sem

er kynnt á aðeins við um samfelldar brýr með malbiki en ekki fyrir brýr sem eru með klæðningu á aðlægum vegum þar sem hættu er á að klæðningin flagni af brúarendunum ef klætt er beint ofan á sigplötuna. Frágangur brúarenda á samfelldum brúm með klæðningu á aðlægum vegum þarf samt sem áður að búa yfir þeim eiginleika að hægt sé að malbika veginn seinna meir án þess að orsaki endurteknar skemmdir í vegyfirborðinu við brúarendana.

Nýja fráganginum á brúarendum þarf að fylgja eftir til nokkurra ára til að sannreyna að hann sé betri heldur en núverandi frágangur. Lagt er til að velja brýr sem stendur til að byggja og aðlaga úrbæturnar að brúnum og finna aðrar brýr sem eru í notkun til samanburðar. Setja þarf upp vöktunaráætlun fyrir samanburðarbrýrnar sem felur m.a. í sér að mæla styttingu/lengingu brúnna ásamt sigi vegyfirborðs við brúarendann.

9 HEIMILDASKRÁ

- [1] W. Kaufmann og M. Alvarez, „Swiss Federal Roads Office Guidelines for Integral Bridges,“ *Structural Engineering International*, b. 21, nr. 2, pp. 189-194, 2011.
- [2] D. J. White, M. M. Mekkawy, S. Sritharan and M. T. Suleiman, “"Underlying" Causes for Settlement of Bridge Approach Pavement Systems,“ *Performance of Constructed Facilities*, vol. 21, no. 4, 2007.
- [3] G. Sigurðsson og H. S. Ólafsson, „Brúarlengd án þensluraufa,“ Vegagerðin, 2016.
- [4] Håndbok N400, „Bruprojekttering, Projekttering av bruer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner,“ Statens vegvesen håndbokserie, 2015.
- [5] Vegagerðin, „vegagerdin.is,“ Nóvember 2018. [Á neti]. Available: <http://www.vegagerdin.is/upplýsingar-og-utgafa/leidbeiningar-og-stadlar/reglur-um-honnun-brua/>. [Skoðað 3 Mars 2020].
- [6] J. S. Horvath, „Integral-Abutment Bridges: Problems and Innovative Solutions Using EPS Geofom and Other Geosynthetics,“ Manhattan College, New York, 2000.
- [7] O. Burdet, J. Einpaul og A. Muttoni, „Experimental investigation of soil-structure interaction for the transition slabs of integral bridges,“ *Structural Concrete*, b. 16, nr. 4, 2015.

- [8] D. White, S. Sritharan, M. Suleiman, M. Mekkaey og S. Chetlur, „Identification of the Best Practices for Design, Construction, and Repair of Bridge Approaches,“ Iowa State University, 2005.
- [9] J.-L. Briaud, R. W. James og S. B. Hoffman, Settlement of Bridge Approaches (The Bump at the End of the Bridge), Washington, D.C: Transportation Research Board, 1997.
- [10] R. Wendner og A. Strauss, „Inclined Approach Slab Solution for Jointless Bridges: Performance Assessment of the Soil-Structure Interaction,“ *Journal of Performance of Constructed Facilities*, b. 29, nr. 2, 2014.
- [11] M. Y. Abu-Farsakh og Q. Chen, „Field demonstration of new bridge approach slab designs and performance,“ Louisiana Transportation Research Center, 2014.
- [12] E. J. Hoppe, „Guidelines for the use, Design, and Construction of Bridge Approach Slabs,“ Virginia Transportation Research Council, Virginia, 1999.
- [13] E. F. Cosgrove og B. M. Lehane, „Cyclic loading of loose backfill placed adjacent to integral bridge abutments,“ *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, b. 3, nr. 3, pp. 9-16, 2003.
- [14] T. A. Thomson, Jr. og A. J. Lutenecker, „Passive Earth Pressure Tests On An Integral Bridge Abutment,“ *Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, b. 9, nr. 12, pp. 733-739, 1998.
- [15] E. J. Hoppe, „Field Study of Integral Backwall with Elastic Inclusion,“ Virginia Transportation Research Council, Virginia, 2005.
- [16] J. Rodriguez, F. Martinez og J. Marti, „Integral Bridge for High-Speed Railway,“ *Structural Engineering International*, b. 21, nr. 3, pp. 297-303, 2011.
- [17] O. Kerokoski, „Haavistonjoki Bridge Field Tests,“ *International Workshop on the Bridges with Integral Abutments*, b. 14, pp. 37-52, 2006.
- [18] L. Miao, F. Wang, J. Han og W. Lv, „Benefits of geosynthetic reinforcement in widening of embankments subjected to foundation differential settlement,“ *Geosynthetics International*, b. 21, nr. 5, pp. 321-332, 2014.

- [19] M. Pötzl, „Jointless Concrete Bridges - Development of a Flexible Abutment,“ *IABSE Symposium Weimar 2007. Improving Infrastructure Worldwide* International Association for Bridge and Structural Engineering., 2007.
- [20] T. E. Frydenlund og R. Aabøe, „Long Term Performance and Durability of EPS as a Lightweight Filling Material,“ *3rd Conference International EPS Geofoam 2001*, 2001.
- [21] L.-M. B. Andersen, J. A. Tjernsbekk, T. A. Stang og K. Lindqvist, „Ekspandert polystyren i norsk vegbygging: en tilstandsundersøkelse av tidlige EPS-fyllinger,“ Høgskolen i Østfold, Østfold, 2011.
- [22] D. Dreier, O. Burdet og A. Muttoni, „Transition Slabs of Integral Abutment Bridges,“ *Structural Engineering International*, b. 21, nr. 2, pp. 144-150, 2011.
- [23] A. A. Islam, „On Reducing Bumps at Pavement-Bridge Interface,“ YSU Center for Transportation and Materials Engineering (CTME), Youngstown, 2010.
- [24] A. P. Yannotti, S. Alampalli og H. L. White, „New York State Department of Transportation's Experience with Integral Abutment Bridges,“ *Integral Abutment and Jointless Bridges*, Baltimore, Maryland, 2005.
- [25] Q. Chen og M. Abu-Farsakh, „Mitigating the bridge end bump problem: A case study of a new approach slab system with geosynthetic reinforced soil foundation,“ *Geotextiles and Geomembranes*, b. 44, nr. 1, pp. 39-50, 2016.
- [26] L. Greimann, B. Phares, A. Faris og J. Bigelow, „Integral Bridge Abutment-to-Approach Slab Connection,“ Iowa State University, 2008.
- [27] The Highways Agency, „The Design of Integral Bridges, BA 42/96 amendment NO. 1,“ The Highways Agency, Scottish Executive Development Department, Welsh Assembly Government og The Department for Regional Development Northern Ireland, 2003.
- [28] Statens Vegvesen Vegdirektoratet, „Vegbygging høringsutgave [Handbok 018],“ 2011.