



Ákvörðun á sigspá fyrir vegi um mýrlendi

Arnar Freyr Þrastarson



**Umhverfis- og
byggingarverkfræðideild
Háskóli Íslands**

Ákvörðun á sigspá fyrir vegi um mýrlendi

Arnar Freyr Þrastarson

30 eininga ritgerð sem er hluti af
Magister Scientiarum gráðu í byggingarverkfræði

Leiðbeinendur
Dr. Sigurður Erlingsson
Haraldur Sigursteinsson

Prófdómari
Dr. Þorbjörg Sævarsdóttir

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, maí 2016

Ákvörðun á sigspá fyrir vegi um mýrlendi
30 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í byggingarverkfræði

Höfundarréttur © 2016 Arnar Freyr Þrastarson
Öll réttindi áskilin

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Hjarðarhagi 2-6
107 Reykjavík

Sími: 525 4600

Skráningarupplýsingar:

Arnar Freyr Þrastarson, 2016, *Ákvörðun á sigspá fyrir vegi um mýrlendi*, meistararitgerð,
umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands, 91 bls.

Prentun: Háskólaprent
Reykjavík, júní 2016

Útdráttur

Veglagning um mýrlendi á Íslandi er nokkuð algeng vegna víðfeðmra mýrlendissvæða sem fara þarf um til að tengja byggðir landsins saman. Veglagning um slík svæði er ýmsum vandkvæðum háð vegna sérstakra eiginleika mýrarjarðvegs. Mýri hefur reynst afskaplega samþjappanleg, með hátt rakainnihald og tiltölulega lágan skúfstyrk.

Hér á landi hafa vegir verið látnir fljóta ofan á mýrinni og er þá mikilvægt að setja ekki of mikið álag í einu á mýrina sem gæti valdið skúfbroti. Til þess að takast á við þetta í hönnun og framkvæmd hafa verið gerðar greiningar á skriði fyllingar og sigspár sem segja til um magn og tímalengd sigs. Sigspár skiptast upp í skamm- og langtímasigspár en útjöfnun vatnsþrýstings í mýrinni veldur skammtímasigi meðan endurröðun jarðvegstrefja undir stöðugu álagi orsakar langtímasig. Markmið þessarar ritgerðar er að skoða hvað ber að hafa í huga við vegagerð um mýrlendi og varpa ljósi á og skrásetja þá aðferðafræði sem notuð er við sigreikninga vegna slíkrar vegagerðar.

Þeirri þekkingu verður síðan beitt á nýjan Suðurlandsveg sem áætlaður er milli Hveragerðis og Selfoss, en sá vegur kemur til með að liggja að stórum hluta um mýrlendi. Þá verður skrið fyllingar vegna mögulegs skúfbrots skoðað, útbúnar skamm- og langtímasigspár og rætt um aðferðir til þess að koma í veg fyrir mismunasig og sig á líftíma vegarins. Með nákvæmum greiningum og sigspám er hægt að athuga hvar í sigferlinu vegurinn er staddur hverju sinni og hvort veglagning fylgi sigspá eftir. Ef vel tekst til við hönnun og framkvæmd er hægt að koma í veg fyrir, eða minnka allverulega, sig á notkunartíma vegarins með minni kostnaði í framkvæmd og viðhaldi.

Abstract

Construction of roads in Iceland around peatlands, to link the settlements of the island together, is somewhat common due to large spread peat zones. Road construction on such grounds can be problematic due to specific characteristics of the peat. Peat has tried out to be very compressible, with high moisture content and relatively low shear strength.

In Iceland the method of letting the roads float on top of the peat has been used and then it is important to use suitable load at each time step so shear failure will not be caused in the peat. To deal with this in design and construction there has been carried out analysis on the stability of embankments and settlements predictions which give an indication of the quantity and time length of the settlement. Settlement predictions can be divided into short term and long term predictions. Leveling of pore water pressure in the peat cause the former while rearrangement of soil fibers under constant load cause the latter. The objective of this project is to look at what has be kept in mind when constructing road on peat and shed light on and document the methodology that is used in settlement predictions due to such construction.

That knowledge will then be applied on new Suðurlandsvegur road which is proposed between Hveragerði and Selfoss, which will be constructed mainly on peat. The stability of embankments will be checked, short and long term settlement predictions generated and discussed methods to reduce differential settlement and settlement in the lifetime of the road. With precise analysis and settlement predictions it can be checked where in the settlement process the road is placed each time and if the road construction is following the prediction. If design and construction of the road is successful, settlement in the lifetime of the road can be prevented at all or dramatically reduced with less cost in construction and maintenance.

Efnisyfirlit

Myndir	ix
Töflur	xiii
Breytuheiti.....	xv
Þakkir	xvii
1 Inngangur	1
1.1 Skipulagning ritgerðar	1
2 Mýri og mýrarjarðvegur	3
2.1 Myndun og eiginleikar	3
2.2 Þróun votlendissvæða.....	4
2.2.1 Verndun votlendis	5
3 Vegagerð	7
3.1 Vegir á Íslandi	7
3.2 Nýjar veglagnir.....	9
3.2.1 Fylling.....	9
3.2.2 Styrktarlag.....	9
3.2.3 Burðarlag.....	10
3.2.4 Slitlag	10
4 Veglagning um mýrlendi	11
4.1 Forðun mýrlendis	11
4.2 Útgröftur.....	11
4.3 Útskipti mýrar.....	12
4.4 Tilfærsla mýrlendis.....	12
4.5 Óhreyft mýrlendi	13
4.5.1 Styrkingaraðgerðir	14
4.5.2 Álagsaðgerðir	14
4.5.3 Styrking undirstöðu.....	15
4.5.4 Lóðrétt afvötnun.....	16
4.5.5 Staurar	16
4.5.6 Jarðvegsbinding	16
4.6 Aðferð íslensku Vegagerðarinnar.....	16
5 Sigútreikningar	19
5.1 Helstu tegundir sigs	19
5.2 Jarðvegsspennur	20
5.2.1 Spennudreifing vegna utanaðkomandi álags	21
5.3 Skammtímasig	22
5.3.1 Sig á forþéttingarsvæði	24
5.3.2 Sig á jómfrúarsvæði	25

5.4	Tímalengd sigs	27
5.5	Langtímasig.....	31
5.6	Sigreikningar	34
6	Skúfstyrkur	35
6.1	Mohr-Coulomb brotlíkingin.....	35
6.2	Ákvörðun skúfstyrks	36
6.2.1	Skúfstyrkur mýrar.....	36
6.3	Stöðugleiki fláa	36
6.3.1	Stöðugleikagreining.....	37
7	Jarðvegsrannsóknir	39
7.1	Utanhúss.....	39
7.1.1	Veglínuganga.....	39
7.1.2	Veglínuborun	39
7.1.3	Sýnataka.....	40
7.1.4	Grunnvatnsstaða	40
7.1.5	Mæling á sigi	40
7.2	Prófanir í rannsóknarstofu.....	41
7.2.1	Ummýndunarstig	42
7.2.2	Rúmþyngd	42
7.2.3	Rakainnihald	43
7.2.4	Glæðitap.....	43
7.2.5	Ödometer	43
7.3	Reynslulíkingar	51
8	Nýr Suðurlandsvegur	53
8.1	Núverandi aðstæður	53
8.2	Nýr vegur	54
8.2.1	Skipulagsáætlanir.....	55
8.2.2	Jarðfræðilegar aðstæður.....	57
8.3	Gerð sigspár	58
8.3.1	Gögn um Þórustaðamýri 1972.....	58
8.3.2	Ný gögn	58
8.3.3	Forsendur	59
8.3.4	Sigspá eftir vegköflum.....	62
8.3.5	Kennisnið.....	62
8.3.6	Sigspá út frá kennisniði	63
8.4	Stöðugleiki fyllingar	68
8.5	Túlkun niðurstaðna	70
9	Lokaorð	73
	Heimildir	75
	Viðauki A	79
	Viðauki B.....	85
	Viðauki C	91

Myndir

Mynd 3.1: Grunnnet samganga á Íslandi í lofti, láði og legi (Vegagerðin, 2012).....	7
Mynd 3.2: Lengd þjóðvega á Íslandi eftir flokkum í lok árs 2015 (stofnvegir um hálendi aðskildir frá öðrum stofnvegum) (Vegagerðin, 2015a).	8
Mynd 3.3: Veghlot vegar og mismunandi hlutar þess, byggt á Vegagerðin (2016).....	9
Mynd 4.1: Útgröftur mýrar (Munro, 2004).	11
Mynd 4.2: Útskipti mýrar (Munro, 2004).	12
Mynd 4.3: Tilfærsla mýrlendis (Munro, 2004).	13
Mynd 4.4: Upptalning á þeim aðgerðum sem hægt er að framkvæma þegar mýrlendi er óhreyft (Munro, 2004).	13
Mynd 4.5: Mótfylling á veg og brotringur vegna skriðs fyllingar (Munro, 2004).....	15
Mynd 5.1: Líkingarmynd sem sýnir ferli þéttingar, líkt og skammtímasig í jarðvegi, byggt á Das og Sobhan (2014).....	20
Mynd 5.2: Samspil heildarspennu, vatnsþrýstings og virkrar spennu í vatnsmettuðum jarðvegi (Sigurður Erlingsson, 2011).	21
Mynd 5.3: Spennudreifing í jarðvegi vegna álags sem verkar ofan á jarðveg samkvæmt Boussinesq, byggt á Janbu (1970).	22
Mynd 5.4: Færsla sýnis sem fall af tíma fyrir tiltekið álagsþrep (Das og Sobhan, 2014).	23
Mynd 5.5: Samband virkrar spennu og streitu, byggt á Janbu (1970).....	23
Mynd 5.6: Samband spennumótstöðu og virkrar spennu, byggt á Janbu (1970).	24
Mynd 5.7: Ákvörðun á spennustuðlinum a, byggt á Janbu (1970).	26
Mynd 5.8: Flæði vatns í gegnum smáa jarðvegseiningu (Das og Sobhan, 2014).	28
Mynd 5.9: Aðalþéttingarhlutfall og aðaltímastuðull fyrir mismunandi dreifingu á formbreytingu, byggt á Janbu (1970).	31
Mynd 5.10: Tímamótstaða sem fall af tíma og tímamótstöðustuðull sem fall af virkri spennu, byggt á Janbu (1970).	32
Mynd 5.11: Aukapéttingarhlutfall sýnt sem fall af aukatímastuðli fyrir mismunandi gildi á tímasambandsstuðli, byggt á Janbu (1970).	33
Mynd 6.1: Mohr-Coulomb brotlíkingin (Das og Sobhan, 2014).....	35

Mynd 6.2: Mismunandi brotmyndir vegna skriðs fyllingar (Das og Sobhan, 2014).	38
Mynd 7.1: Borvagn sömu gerðar og Vegagerðin notar í jarðvegsrannsóknir. Hann getur meðal annars framkvæmt snúnings- og þrýstiborun (Geonor, e.d.).....	40
Mynd 7.2: Dæmigerð uppsetning sigplötu í öxl eða miðju veglínu nýs vegar.	41
Mynd 7.3: Afstöðumynd af mælingu í sigslöngu með notkun þrýstiskynjara (ROADX Network, e.d.).....	41
Mynd 7.4: Jarðvegssýni prófað í sérsmíðuðum ödometer (Haraldur Sigursteinsson, 2010).....	44
Mynd 7.5: Formbreyting sýnis sem fall af virkri spennu.	45
Mynd 7.6: Formbreyting sem fall af tíma fyrir álagsþrepin fimm. Á myndinni er besta lína í gegnum fyrrihluta punktastöðsins sýnd og lárétt lína sem stendur fyrir 100% þéttingu. Þá er reiknaður þéttingarstuðull sýndur.	47
Mynd 7.7: Þéttingarstuðull sem fall af meðalspennu auk meðaltals þéttingarstuðuls.	48
Mynd 7.8: Spennumótstaða sem fall af virkri meðalspennu. Búið er að reikna út spennumótstöðu efnisins, módultölu og forþéttingarspennu.....	49
Mynd 7.9: Tímamótstaða sem fall af meðaltímanum. Einnig er búið að reikna tímamótstöðustuðul fyrir hvert og eitt álagsþrep.	50
Mynd 7.10: Tímamótstöðustuðull sem fall af meðalspennu auk þess sem reiknuð forþéttingarspenna er sýnd.	51
Mynd 7.11: Tengsl módultölu og efnisraka sýnd fyrir mýrarjarðveg, byggt á Jón Skúlason (1992).....	52
Mynd 7.12: Tengsl tímamótstöðustuðuls og efnisraka sýnd fyrir mýrarjarðveg, byggt á Jón Skúlason (1992).	52
Mynd 8.1: Núverandi Suðurlandsvegur milli Hveragerðis og Selfoss. Byggt á gögnum frá Landmælingum Íslands.....	54
Mynd 8.2: A ₃₄ þversnið, tvær akreinar í hvora átt aðskildar með miðdeili (EFLA verkfræðistofa, 2010).	55
Mynd 8.3: Áætluð veglína nýs Suðurlandsvegar frá Hveragerði austur fyrir Selfoss (EFLA verkfræðistofa, 2010).	55
Mynd 8.4: Aðalskipulag Hveragerðisbæjar 2005-2017 í kringum nýjan Suðurlandsveg (Landform ehf, 2006).	56
Mynd 8.5: Aðalskipulag Árborgar 2010-2030 í kringum nýjan Suðurlandsveg sem áætlað er að liggi um Efri-Laugarðælaeyju (Vinnustofan Þverá, 2010).	57

Mynd 8.6: Mýrarþykkt á þeim svæðum þar sem mýrar varð vart og mældur raki rakasýna.	59
Mynd 8.7: Langsnið í áætlaðan Suðurlandsveg. Sýnd er núverandi landhæð miðlínu nýs vegar, áætluð veghæð miðlínu nýs vegar, lega mýrar í vegstæðinu og skipting sigspár.	60
Mynd 8.8: Kennisnið fyrir aðra akbraut nýs Suðurlandsvegar.....	62
Mynd 8.9: Skammtímasig miðað við mismunandi mýrarþykktir og fyllingarhæðir.....	64
Mynd 8.10: Sigspá fyrir langtímasig miðað við 20 kPa álag í miðri mýrinni og mismunandi mýrarþykktir.	65
Mynd 8.11: Sigspá fyrir langtímasig miðað við 50 kPa álag í miðri mýrinni og mismunandi mýrarþykktir.	66
Mynd 8.12: Samsett skamm- og langtímasig fyrir 20 kPa álag í miðri mýrinni og mismunandi mýrarþykktir.	67
Mynd 8.13: Samsett skamm- og langtímasig fyrir 50 kPa álag í miðri mýrinni og mismunandi mýrarþykktir.	67
Mynd 8.14: Skilgreint þversnið með þéttu sandlagi neðst, síðan mýrarlag og efst fylling sem lögð er út í tveimur þrepum.	68
Mynd 8.15: Skrið fyllingar eftir misgengisfleti.....	69
Mynd 8.16: Skrið fyllingar eftir útlögn mótfyllingar. Hætta á skriði er nær engin.....	70

Töflur

Tafla 5.1: Spennustuðlar og módultölur fyrir mismunandi jarðefni (Sigurður Erlingsson, 2014).....	26
Tafla 7.1: Einfölduð tafla fyrir flokkunarkerfi von Post (Karlsson og Hansbo, 1989).	42
Tafla 7.2: Tölulegar upplýsingar um sýnið.	45
Tafla 8.1: Efniseiginleikar sýna úr gryfjum 1 og 2, sýni tekin á 0,9-4,4 m dýpi. Efniseiginleikarnir eru gefnir sem meðaltal eða á ákveðnu bili.	58
Tafla 8.2: Skipting greiningarsvæðis fyrir gerð sigspár. Svæðin byrja í vestri og enda í austri.	60
Tafla 8.3: Forsendur notaðar til sigreikninga á Suðurlandsvegi.....	61
Tafla 8.4: Niðurstöður sigspár fyrir greiningarsvæðið á Suðurlandsvegi. Langtímasig er reiknað við 20 ár.	62
Tafla 8.5: Fyllingarþykktir út frá mismunandi mýrarþykktum og tveimur álagsþrepum.	63
Tafla 8.6: Þéttingartími út frá gefnum mýrarþykktum.	64

Breytuheiti

A	Þverskurðarflatarmál sýnis
A_s	Flatarmál sigs undir þversniði vegar
a	Spennustuðull jarðefnis
B	Breidd álagsflatar
b	Breidd akbrautar
c, c'	Samloðun jarðefnis, virk samloðun jarðefnis
c'_d	Virk samloðun verkandi skúfkrafts
c_u	Óframræstur skúfstyrkur
c_v	Þéttingarstuðull
d	Dýpi sýnis
$\Delta\varepsilon_p$	Hlutfallsleg aukning formbreytingar skammtímasigs
$\Delta\sigma'$	Aukning í virkri spennu
ε	Lokin formbreyting
$\bar{\varepsilon}$	Ólokin formbreyting jarðefnis
ε_p	Skammtímaformbreyting jarðvegs
$\varepsilon_{p,pc}$	Skammtímaformbreyting á forþéttingarsvæði
$\varepsilon_{p,v}$	Skammtímaformbreyting á jómfrúarsvæði
ε_s	Langtímaformbreyting jarðefnis
F_S	Öryggisstuðull fyllingar
$F_{c'}$	Öryggisstuðull m.t.t. virkrar samloðunar
$F_{\varphi'}$	Öryggisstuðull m.t.t. virks viðnámshorns
γ, γ_d	Rök rúmþyngd jarðefnis, þurr rúmþyngd jarðefnis
γ_f	Rúmþyngd fyllingar
γ_w	Rúmþyngd vatns (9,81 kN/m ³)
H	Heildarþykkt jarðvegs
H_{dr}	Lengd (þykkt) afrennslisleiðar vatns
H_f	Hæð fyllingar á vegi
h	Hæð sýnis
\bar{h}	Meðalhæð fyllingar að teknu tilliti til fláa
i	Þrýstifall
k	Lektarstuðull jarðvegs
M	Spennumótstaða jarðefnis
m	Módultala jarðefnis
OCR	Yfirþrýstingshlutfall
φ, φ'	Viðnámshorn jarðefnis, virkt viðnámshorn jarðefnis
φ'_d	Virkt viðnámshorn verkandi skúfkrafts
q	Álag (frá fyllingu)
R	Tímamótstaða jarðefnis
r_s	Tímamótstöðustuðull
s	Sig á tímapunktinum t
s_e	Fjaðrandi (e. elastic) sig
s_p	Skammtímasig (aðalsig)

$s_{p.pc}$	Skammtímasig á forþéttingarsvæði
$s_{p.v}$	Skammtímasig á jómfrúarsvæði
s_s	Langtímasig (aukasig)
s_T	Heildarsig
σ	Heildarspenna jarðvegs / normalspenna hornrétt á brotflöt
$\bar{\sigma}$	Meðalspenna í jarðvegi
σ'	Virk spenna jarðvegs / virk normalspenna hornrétt á brotflöt
σ'_0	Núverandi virk spenna í jarðvegi
σ_a	Viðmiðunarspenna, 100 kPa
σ_{pc}'	Forþéttingarspenna jarðefnis
T_p	Aðaltímastuðull
T_r	Tímasambandsstuðull
T_s	Aukatímastuðull
t	Tími
t_p	Þéttingartími
t_r	Viðmiðunartími
τ_d	Verkandi skúfspenna eftir brotfloti
τ_f	Skúfstyrkur jarðefnis
U_p	Aðalþéttingarhlutfall
U_s	Aukaþéttingarhlutfall
u	Vatnsþrýstingur jarðvegs
V	Heildarrúmmál sýnis
v	Rennslis hraði vatns
W	Heildarþyngd sýnis
W_s	Þyngd jarðefnis sýnis
W_w	Þyngd vatns sýnis
w	Rakainnihald jarðefnis
z	Dýpt jarðvegs

Þakkir

Höfundur vill koma á framfæri þökkum til allra þeirra sem veittu góðan stuðning og hvatningu við vinnslu verkefnisins. Sérstakar þakkir fá:

Dr. Sigurður Erlingsson prófessor við Háskóla Íslands og leiðbeinandi þessa verkefnis fyrir góða leiðbeiningu og hvatningu við mótun og vinnslu verkefnisins.

Haraldur Sigursteinsson deildarstjóri hjá Vegagerðinni og meðleiðbeinandi þessa verkefnis fyrir útvegum gagna, veittar upplýsingar og góðar ábendingar við vinnslu verkefnisins.

Vegagerðin fyrir veittan styrk til vinnslu verkefnisins.

Foreldrar og nánasta fjölskylda, án ykkar hvatningar og stuðnings í gegnum árin hefði þetta verkefni ekki orðið að veruleika.

1 Inngangur

Samgöngur eru hverju samfélagi mikilvægar. Í landi þar sem byggð er dreifð eins og á Íslandi eru vegir enn nauðsynlegri. Á Íslandi eru tæplega þrettán þúsund kílómetrar af vegum á forræði Vegagerðarinnar (Vegagerðin, e.d.) og því er óhjákvæmilegt við veglagningu að þurfa að fara yfir mismunandi gerðir landslags, eins og t.d. mýrlendi.

Þegar vegir eru lagðir um mýrlendi þarf að grípa til sértækra aðgerða vegna sigs, en mýrar eru þeim eiginleikum gæddar að hafa mjög lágan skúfstyrk og mjög hátt rakainnihald, en rakinn getur oft og tíðum verið mörg hundruð prósent. Í gegnum árin hefur byggst upp reynsla og þekking vegna veglagningar um mýrlendi og til eru hinar ýmsu aðferðir við veglagningarnar. Á Íslandi hefur þó aðallega verið farin sú leið að láta vegina fljóta ofan á mýrinni.

Þegar álag vegna nýrrar vegbyggingar kemur ofan á mýri, pressast vatnið úr henni og hún þjappast saman. Þetta er ferli skammtímasigs sem tekur yfirleitt nokkra daga eða fáeinar vikur. Álagsaukningin þarf að vera hæfilega mikil því annars er hætta á að jarðvegsþekja mýrarinnar gefi sig (springi) með skriði fyllingarinnar og tilheyrandi fyllingarauka. Þegar skammtímasigi er lokið og vegurinn virðist vera farinn að ná jafnvægi fara trefjar í jarðveginum að endurraða sér undir stöðugu álaginu sem orsakar aðra tegund af sigi, langtímasig. Slíkt sig á sér stað yfir langt tímabil, mörg ár, og því er nauðsynlegt að geta gripið til aðgerða til að framkalla slíkt sig á skömmum tíma. Bæði skamm- og langtímasig er hægt að reikna með aðferð sem Norðmaðurinn Nilmar Janbu kom fram á sjónarsviðið með í kringum árið 1970. Út frá slíkum reikningum er hægt að gera sigspár sem spá fyrir um sig vegar miðað við gefnar forsendur.

Nýr tvöfaldaður Suðurlandsvegur sem áætlaður er milli Hveragerðis og Selfoss liggur að stórum hluta um mýrlendi og má búast við töluverðu sigi á þeim kafla. Traustar sigspár skipta þar miklu máli og sér í lagi áreiðanlegar sigmælingar svo hægt sé að athuga hvar í sigferlinu vegurinn er hverju sinni og hvort mýrin fylgi þeirri hegðun sem lögð var fram í sigspánni. Ef frávik milli sigspár og sigmælinga verða getur þurft að endurskoða sigspána þar sem hönnun vegarins byggir á sigspánni, og þá jafnvel hönnunina sjálfa. Ef vel tekst til við hönnun og framkvæmd er hægt að koma í veg fyrir, eða minnka allverulega sig á notkunartíma vegarins.

Markmið þessarar ritgerðar er að varpa ljósi á og skrásetja þá aðferðafræði sem notuð er við sigreikninga vegna vegagerðar um mýrlendi og skoða hvað ber að hafa í huga við vegagerð um mýrlendi. Þá verður öryggisstuðull vegna skriðs fyllingar vegna mögulegs skúfbrots í mýrinni einnig skoðaður. Síðan verður þeirri þekkingu beitt til notkunar á raunverulegu dæmi og gæði sigspár skoðuð.

1.1 Skipulagning ritgerðar

Í upphafi ritgerðarinnar verður fyrst vikið að mýrum og mýrlendi á Íslandi. Hvar sé hægt að búast við slíkum aðstæðum og hvernig uppbygging þeirra er. Því næst verður vegagerð

skoðuð almennt, gerð og lengd vega á Íslandi og hvernig þeir eru uppbyggðir. Í fjórða kafla er fjallað um veglagningu í mýrlendi og hvaða aðferðir hafa verið notaðar, bæði hérlendis og erlendis.

Næst er vikið að útreikningum á sigi, fjallað um gerðir sigs og hvernig stærð sigs og tímalengd er reiknuð. Þá verður skúfstyrkur skoðaður og hvernig hægt er að ákvarða öryggisstuðul vegna skriðs fyllingar. Í sigútreikningum eru notaðar ýmsar stærðir um efniseiginleika mýrarinnar og er þá komið að umfjöllun um jarðvegsrannsóknir. Slíkar rannsóknir skiptast í rannsóknir utanhúss og prófanir á rannsóknarstofu.

Með þá þekkingu sem búið er að leggja fram á þessum tímapunkti er hægt að fara í greiningu á tilteknu viðfangsefni. Hér verður rýnt í nýjan Suðurlandsveg milli Hveragerðis og Selfoss. Skoðuð verða eldri gögn og borin saman við nýrri, veglína nýs vegar skoðuð og sigspá gerð fyrir veginn í heild og ákveðin kennisnið. Þá verður einnig tekin til umfjöllunar stöðugleikagreining á fyllingu vegar ofan á mýri. Að þessu loknu verða helstu niðurstöður teknar saman og rætt um hagnýtingu þessarar aðferðar við veglagningu um mýrlendi.

2 Mýri og mýrarjarðvegur

Jarðvegur hefur verið undirstaða þróunar og eflingar lífs á jörðinni allt frá upphafi. Jarðvegur hefur séð mönnum fyrir næringu þegar hann hefur verið notaður til ræktunar og hann hefur verið nýttur sem undirstaða eða innihaldsefni í mörgum framfaraskrefum mannkynsins, svo sem við gerð samgöngukerfa og bygginga.

Ein orðabókarskilgreining á jarðvegi skilgreinir hann á tvo vegu, annars vegar í náttúrulegum skilningi þar sem hann er skilgreindur sem það yfirborðslag jarðskorpunnar þar sem gróður þrífst og hins vegar í jarðtæknilegum skilningi sem efsti hluti jarðskorpunnar þar sem laus jarðlög liggja ofan á berggrunni (Dóra Hafsteinsdóttir og Sigríður Harðardóttir, 1990).

Þó má ætíð skipta jarðvegi upp eftir þeim efnum sem mynda hann, en þau eru tvö, ólífræn og lífræn efni. Ólífræn efni, einnig kölluð steinefni, eru agnir sem hafa veðrast úr berggrunni eins og t.d. mól og sandur. Þau eru m.a. notuð sem uppbyggingarefni í vegagerð eða fylliefni í steinsteypu. Aftur á móti myndast lífræn efni úr rotnuðum eða rotnandi leifum lífvera, hvort sem er dýrum eða plöntum og innihalda kolefni (Grétar Guðbergsson og Þorleifur Einarsson, 1998). Má nefna mold í því samhengi. Mýrarjarðvegur fellur undir síðarnefndu flokkunina og verður sjónum aðallega beint að umfjöllun um myndun, eðli og gerð hans hér í framhaldinu.

2.1 Myndun og eiginleikar

Almennur skilningur fólks á mýri og mýrarjarðvegi virðist vera að þar sé átt við land sem sé meira eða minna vott. Nánari og betri skilgreiningu má fá í orðum Steindórs Steindórssonar frá Hlöðum (1975, bls. 22) sem lýsir mýri svo: „Til mýrlendis tel ég öll þau gróðurfélög, sem vaxa á svo rökum jarðvegi, að jarðvatnið nær upp undir yfirborð jarðvegsins eða flýtur yfir hann að minnsta kosti nokkurn hluta úr árinu“.

Á heimsvísu liggur meginútbreiðsla mýra um norðanvert tempraða beltíð nyrðra og norður eftir nyrðra kuldabeltinu eins langt og samfelldur gróður nær. Ísland liggur á mörkum nyrðra kuldabeltisins og tempraða beltinu nyrðra en áætlað er að mýrlendi sé um 8-10% af öllu yfirborði landsins (Sturla Friðriksson, 1973). Algeng þykkt mýrlendis á Íslandi er 2-6 m (Þorleifur Einarsson, 1975).

Mýrum á Íslandi er skipt upp í tvo meginflokkka til aðgreiningar eftir því í hvernig landslagi þær myndast, það er flóamýrar og hallamýrar. Flóamýrar myndast þegar dældir í landslaginu fyllast smám saman, þá helst forn tjarnar- eða vatnsstæði. Hallamýrar myndast hins vegar þegar landsvæði sem áður var þurrt, blotnar (Þorleifur Einarsson, 1975).

Hvort sem um er að ræða flóamýri eða hallamýri þá myndast mórinn í mýrinni á svipaðan hátt. Þegar gróður- og dýraleifar falla í botn vatnasvæðisins, t.d. að hausti þegar gróður fellur, ná leifarnar ekki að rotna þar sem ekkert loft kemst að. Grunnvatnsstaðan er það há, oftast í yfirborði, að súrefni og loftsækinn gerlagróður ná ekki að valda rotnun. Þó verður eins konar ófullkomin rotnun af völdum gerla þannig að mórinn verður smátt og smátt snauðari af

súrefni, vetni og köfnunarefni en þeim mun ríkari af kolefni. Íslenskur mýrarjarðvegur hefur þó það sérkenni umfram mýrar í nágrannalöndum hversu steinefnaríkur hann er. Steinefnin rekja uppruna sinn til gosösku og vikurs frá eldfjöllum annars vegar og hins vegar berg- og móbergsmýlsnu, það er að segja fokseti. Foksetið berst af aurum vatnsfalla, sandflákum með fram sjó og gróðurvana fjalla- og hálendissvæðum (Þorleifur Einarsson, 1975). Þó hafa íslenskar mýrar einkennisgróður mýrlenda sem kemur til að mestu leyti vegna hárrar grunnvatnsstöðu (Grétar Guðbergsson og Þorleifur Einarsson, 1998).

Eins og áður sagði, þá myndast flóamýrar þegar lífrænar leifar, sandur og leir falla til botns í tjörnum og vötnum þannig að botninn hækkar. Mómyndun fer fram frá bökkunum og heldur áfram þangað til vatnið eða tjörninn fyllist. Undirflokkar flóamýra eru flæðimýrar, dý og flár. Flæðimýrar er helst að finna með fram ám sem flæða oft yfir bakka sína og einnig við sjó á bak við malarkamba og sandöldur. Dý verða aðallega til þar sem grunnvatn kemur fram í lindum. Síðasti undirflokkurinn, flár er helst að finna á miðhálandi landsins, í 400-600 m hæð, í dældum eða með fram ám (Þorleifur Einarsson, 1975).

Sá flokkur mýra sem meginhluti votlendis á Íslandi telst til er hallamýrar. Þær verða til þar sem nýtur mikillar úrkomu, lítillar uppgufunar og lágs hitastigs. Þetta samspil veldur því að jarðvegurinn helst ætíð votur. Mýrarnar eru því ekki háðar landslaginu eins og flóamýrar. Hins vegar eru þær að einhverju leyti háðar gerð berg- eða jarðvegsgrunnnsins og eru algengari í þéttum jarðlögum en gröpunum (Þorleifur Einarsson, 1975).

2.2 Þróun votlendissvæða

Allt frá því að Ísland var fyrst numið hefur þurft að nýta landið eins og kostur er. Allt frá landnámi fram til ársins 1870 var votlendi nýtt í landinu eins og það kom fyrir. Á tímabilinu 1870 til 1940 var farið í gerð áveita til þess að veita vatni á mýrarnar svo hægt væri að auka afköst mýranna, það er að hraða vexti þess gróðurs sem þar var nýttur. Upp úr 1940 var síðan farið í það að ræsa fram mýrar á Íslandi. Réði þar mestu um að það kom véldrifin skurðgrafa til landsins sem gerði það að verkum að hægt var að grafa skurði og það á ásættanlegum hraða. Mýrarnar voru ræstar fram til þess að draga vatnið úr þeim og gera úr þeim tún sem hægt væri að nota til ræktunar. Á síðari hluta tuttugustu aldarinnar fór að byrja umræða um það hér á landi hver áhrif slíkrar framræslu væru. Í kringum árið 1996 var þessu að mestu snúið við, framræslu hætt og þess í stað farið að endurheimta votlendi (Hlynur Óskarsson, 2010). En áður en það atriði verður skoðað er ekki úr vegi að skoða frekar hvað gerist við landið þegar það er ræst fram.

Þegar land er framræst verða tvær grundvallarbreytingar á lífsskilyrðum í jarðveginum. Í fyrsta lagi kemst súrefnisríkt loft niður í jarðveginn og í öðru lagi breytist hitafar hans. Í hefðbundnum mýrarjarðvegi er súrefni af skornum skammti og þær lífverur sem þar þrífast lifa með loftfirrðri öndun. Rotnun lífrænna leifa verður því mjög hæg og leifarnar safnast að mestu upp. Við framræslu fær súrefni frjálstan aðgang niður í jarðveginn og loftháðar lífverur byrja að þrífast þar. Þær brjóta niður lífræn efni hraðar en loftfirrðu lífverurnar. Með því að þurrka votlendi verður því örari rotnun og þá losna úr plöntuleifunum ýmis næringarefni sem gera jarðveginn frjóan. Við rotnunina gengur smátt og smátt á magn lífrænna efna í mýrunum og jarðvegurinn fellur saman. Við góð lífsskilyrði rotplantna getur framræst mýri fallið verulega saman á skömmum tíma.

Við framræslu minnkar varmarýmd jarðvegsins þannig hann er fljótari að hitna og hitnar meira en áður, loftun verður og örari efnaskipti sem gera hann hentugan í túnraekt (Óttar Geirsson, 1975). Einnig losnar úr jarðveginum koltvísýringur og með tímanum rýrnar einnig næringarefnaforði hans þar sem regnvatn veldur úrskolun úr jarðveginum (Helgi Hallgrímsson, 1975). Þá geta votlendi stuðlað að náttúrulegri stjórnun á flóðum sökum regnvatns og hindrað rof við sjávarstrendur. Einnig er fuglalíf oft og tíðum í miklum blóma á votlendissvæðum (Trausti Baldursson og Ólafur Einarsson, 1998).

Varðandi stærð framræsts lands á Íslandi þá er talið að það nemi um einum tíunda alls mýrlendis í landinu (Sturla Friðriksson, 1973). Með aukinni vitund um það hve mikilvæg votlendissvæði eru hafa farið fram aðgerðir til þess að vernda þau.

2.2.1 Verndun votlendis

Eins og vikið var að hér að ofan eru votlendissvæði mikilvæg í eðli sínu og því ekki skynsamlegt að stuðla að eyðingu þeirra nema brýn ástæða sé til. Áðurnefndar ástæður eru hluti af því að Ramsarsamningurinn var samþykktur árið 1971. Markmið hans var að miklu leyti að vernda votlendissvæði. Á Íslandi var stofnuð nefnd árið 1996 sem hafði það markmið að leggja fram tillögur um hvar og hvernig mætti standa að endurheimt þess votlendis sem þurrkað hafði verið upp með framræslu (Arnþór Garðarsson o.fl., 2006). Markaði það upphaf endurheimt votlendis á Íslandi.

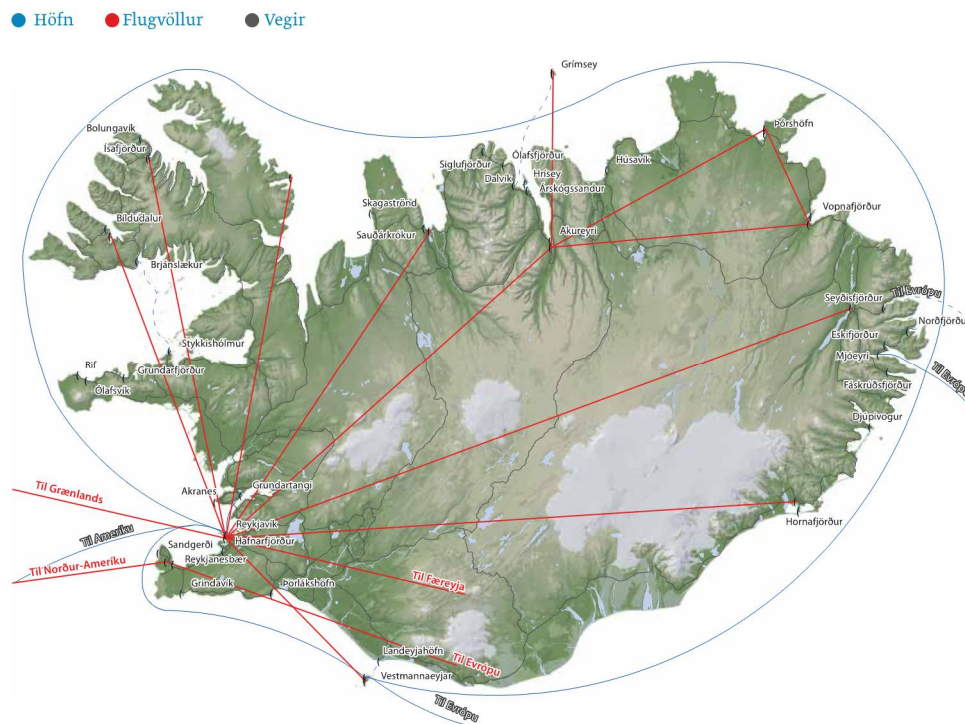
Segja má að endurheimt votlendis sé hluti af almennri náttúru- og landslagsvernd. Með endurheimt þess er verið að skapa lífsskilyrði fyrir fjölbreyttari gróður og dýralíf en ríkti áður. Aukinheldur veldur endurheimt votlendis því að kolefni binst í jarðvegin í staðinn fyrir það að framræstar mýrar losi það út í andrúmsloftið. Varðandi vegagerð hefur verið reynt að raska sem minnst votlendissvæðum en ef það hefur verið óhjákvæmilegt hefur verið reynt að bæta fyrir þá röskun (Arnþór Garðarsson o.fl., 2006).

Þegar fyrirhuguð vegagerð kemur óhjákvæmilega til með að liggja um mýrarjarðveg er nauðsynlegt, með tilliti til þess sem hér hefur verið ritað, að vanda vel að undirbúningi og reyna að raska sem minnst því votlendi sem vegurinn kemur til með að liggja um. Í hefðbundinni veglagningu er reynt að gera vatnsborðið stöðugt áður en framkvæmdir hefjast með skurðgreftri beggja vegna við væntanlega veglínu sem dregur vatnsborðið örlítið niður. Sem dæmi um mótvægisáðgerð vegna slíkrar framkvæmdar er hægt að hugsa sér að draga vatnsborðið upp á nýjan leik eftir vegagerðina þar sem það myndi hjálpa til við endurheimt votlendisins auk þess sem það léttir álagið á nýjan veginn þar sem virk jarðvegsspenna verður lægri en áður. Er því ekki úr vegi að skoða hvernig staðið er að lagningu nýrra vega sem verður lýst hér næst.

3 Vegagerð

Fyrir land eins og Ísland þar sem byggðir eru dreifðar og vegalengdir miklar skipta góðar samgöngur höfuðmáli. Segja má að þær séu lífæð samfélagsins. Til þess að standa undir kröfum um stærri atvinnusvæði og betra aðgengi að vöru og þjónustu þarf sífellt að vinna að endurbótum og nýframkvæmdum á samgöngukerfi þjóðarinnar.

Á Íslandi er almennt talað um þrjár greinar samganga; flugmál, vegamál og siglingamál (Lög um samgönguáætlun nr. 33/2008). Samgöngukerfi sem inniheldur fyrrnefndar þrjár greinar þarf að geta uppfyllt allar þarfir þjóðarinnar fyrir alla flutninga á fólki og vöru. Í samgönguáætlun er skilgreint grunnkerfi sem ætlað er að bera meginþunga samganga, sjá mynd 3.1.



Mynd 3.1: Grunnnet samganga á Íslandi í lofti, láði og legi (Vegagerðin, 2012).

Af þeim þremur þáttum sem grunnnetið samanstendur af er vegakerfið umfangsmest og óhjákvæmilega dýrast í uppbyggingu, viðhaldi og rekstri (Vegagerðin, 2012).

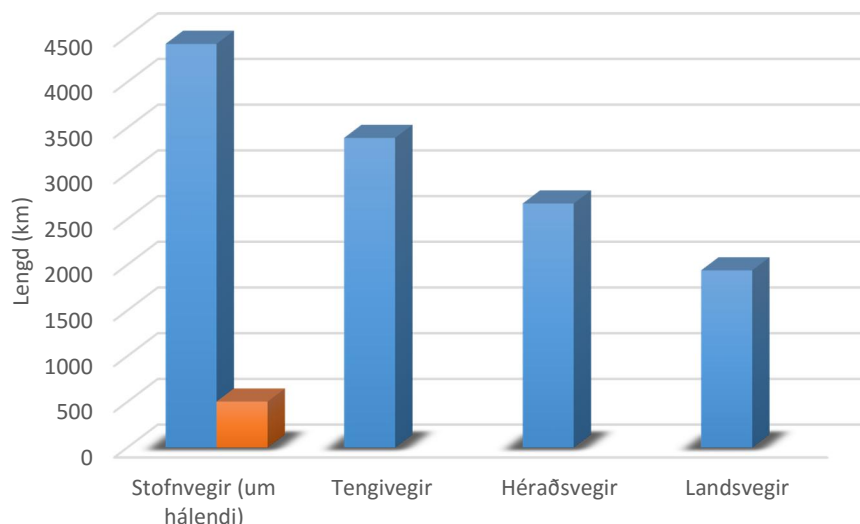
3.1 Vegir á Íslandi

Vegakerfi Íslands skiptist í þjóðvegi, sveitarfélagsvegi, almenna stíga og einkavegi. Fyrrnefndu tveir vegirnir eiga að mynda eðlilegt samfellt vegakerfi til þess að tengja saman byggðir Íslands. Ef litið er nánar á þjóðvegina, sem eru þeir vegir sem ætlaðir eru almenningi

til frjálsrar umferðar þá er þeim skipt upp í fjóra flokka; stofnvegi, tengivegi, héraðsvegi og landsvegi (Vegalög nr. 80/2007):

- Stofnvegir eru hluti af grunnkerfi samganga og teljast til þess flokks vegir sem tengja saman þéttbýlisstaði landsins sem eru með um það bil 100 íbúa eða fleiri. Umferðarmestu vegirnir sem tengja saman sveitarfélög á höfuðborgarsvæðinu og hálendisvegir sem mikilvægir eru fyrir flutninga og ferðaþjónustu teljast þá einnig til stofnvega.
- Tengivegir eru þeir vegir utan þéttbýlis sem tengja saman stofnvegi, stofnvegi og tengivegi, landsvegi og stofnvegi og þéttbýlisstaði með færri en 100 íbúa og stofnvegi. Einnig teljast til tengivega þeir vegir sem liggja að mikilvægum flugvöllum, höfnum og ferjuhöfnum ef þeir teljast ekki til stofnvega og vegir að þjóðgörðum og fjölsóttum ferðamannastöðum utan þéttbýlis.
- Héraðsvegir liggja að býlum, starfsemi atvinnufyrirtækja, kirkjustöðum, opinberum skólum og öðrum opinberum stofnunum utan þéttbýlis.
- Síðasti flokkurinn, landsvegir eru aflagðir byggðavegir á eyðilendum og vegir sem liggja yfir fjöll og heiðar og tilheyra ekki hinum þremur vegflokkunum (Vegalög nr. 80/2007).

Heildarlengd þessara fjögurra vegflokka er 12.920 km, en þar af eru í kringum 5.500 km með bundnu slitlagi (Vegagerðin, e.d.). Nánari skiptingu á lengd þeirra eftir flokkum má sjá á mynd 3.2.



Mynd 3.2: Lengd þjóðvega á Íslandi eftir flokkum í lok árs 2015 (stofnvegir um hálendi aðskildir frá öðrum stofnvegum) (Vegagerðin, 2015a).

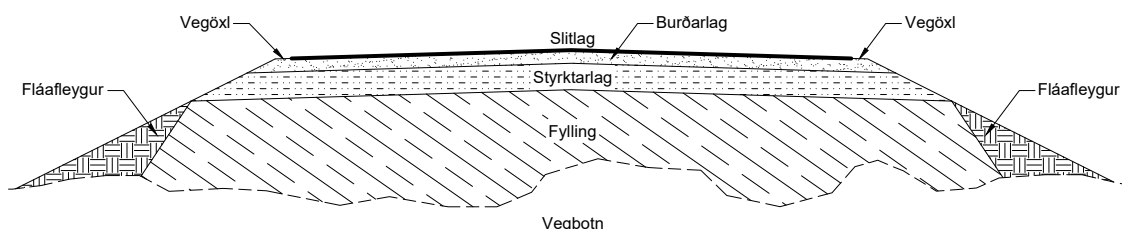
Vegagerðin hefur veghald á fyrrnefndum þjóðvegum landsins en það þýðir að hún hefur forræði yfir vegi og vegsvæði, þar með talið vegagerð, þjónustu og viðhaldi (Vegalög nr. 80/2007). Þjóðvegirnir þarfnast viðhalds og endurbóta með tíð og tíma auk þess sem farið er

í nýlagnir eftir því sem aðstæður krefjast. Við nýlagnir fer í gang hönnunarvinna sem verður vikið að hér næst.

3.2 Nýjar veglagnir

Við hönnun nýrra veglína þarf að huga að mörgu. Fyrst þarf að ákvarða stærð þess vegar sem á að fara að hanna, það er fjöldi akreina og breidd. Fer það eftir áætluðu umferðarálagi en þversniðum vega er skipt upp í flokka frá A-D þar sem A stendur fyrir þversnið umferðarmikilla vega en D fyrir vegi með litla umferð (Vegagerðin, 2011).

Uppbyggingu vegar er almennt séð skipt upp í undirbyggingu og yfirbyggingu sem saman nefnist veghlot, sjá mynd 3.3.



Mynd 3.3: Veghlot vegar og mismunandi hlutar þess, byggt á Vegagerðin (2016).

Undirbyggingin samanstendur af vegbotni og fyllingu en yfirbyggingin af styrktarlagi, burðarlagi og slitlagi. Fyrir hvert lag eru gerðar mismunandi efniskröfur. Efst eru hæstu spennurnar og mesta áraunin og því gerð meiri krafa til efnisgæða heldur en eftir því sem neðar kemur þar sem spennurnar og áraunin eru lægri. Við val á efnum þarf að hafa í huga að lag sem er ofan við áætlað frostdýpi sé frostþolið (Vegagerðin, 2016).

3.2.1 Fylling

Eins og sést á mynd 3.3 er fyllingin neðst í veghlotinu. Hún er gerð úr efnum sem fyrir eru í vegstæðinu, úr næsta nágreinni eða aðfluttu efni úr námum. Fyllingin jafnar vegbotninn og gefur þannig rétta hæð á undirbyggingunni áður en yfirbyggingin kemur ofan á. Í mýrarjarðvegi getur fyllingin sigið umtalsvert og því hefur komið til greina að nota vikur sem fyllingarefni á slíkum svæðum þar sem hann er léttari en hefðbundin fyllingarefni. Ef fyllingin er með brattari fláa en styrktarlag og burðarlag er settur utan á hana fláafleygur með minni halla sem má vera úr lakari efni en fyllingin sjálf. Undirbyggingin þarf að geta borið yfirbygginguna og umferðaralag án mikilla formbreytinga. Fyllinguna þarf að þjappa vel og er hún lögð út með vatnshalla svo vatn safnist ekki fyrir á yfirborði hennar (Vegagerðin, 2016).

3.2.2 Styrktarlag

Næsta lag fyrir ofan fyllinguna er styrktarlag sem á að hafa meira burðarþol en fyllingin en þó ekki mikið meira þar sem burðarþolið á að aukast jafnt og þétt upp á við. Styrktarlagið, ásamt burðarlaginu dreifir umferðaralaginu á undirbygginguna svo ekki komi til formbreytingar á slitlaginu. Styrktarlagið þarf að geta leitt vatn burtu úr veghlotinu, standast

kröfur um berggæði og styrk steinefna og vera frostfrítt. Laginu er oft og tíðum skipt upp í efra og neðra styrktarlag þar sem meiri kröfur eru gerðar til efnisins í efra laginu en því neðra (Vegagerðin, 2016).

3.2.3 Burðarlag

Burðarlag er fyrir ofan styrktarlag og undir slitlaginu. Svipað og styrktarlag á að hafa meiri burð en fylling, þá á burðarlag að hafa meiri styrk en styrktarlag. Burðarlagið tekur við umferðaráluginu og dreifir niður í styrktarlagið. Það á að koma í veg fyrir formbreytingar í slitlaginu og þarf þess vegna að vera stíft og stöðugt auk þess að geta leitt vatn greiðlega burt. Burðarlagið þarf að vera frostfrítt og hafa nægan styrk vegna aflrænnar áraunar. Það er oft lagt í tveimur lögum þar sem það neðra er eilítið grófara en það efra. Þar sem umferðaralag er mikið er lagið oft sements- eða bikbundið (Vegagerðin, 2016).

3.2.4 Slitlag

Slitlag er fyrir ofan burðarlag og er jafnframt yfirborð fullbúins vegar. Yfirborðið á að vera jafnt og slétt og með nægilegt viðnám svo ökutæki renni ekki til. Einnig á slitlagið að þola áraun sem verkar á það frá umferðinni, sem getur falist í núningsáhrifum dekkja, nagladekkjasliti og áraun vegna veðurs. Þá þarf það að vera þétt og hindra sem mest að vatn komist niður í neðri lög vegarins. Slitlög flokkast eftir því hvort þau eru bundin eða óbundin. Bundin slitlög geta verið steipt eða bikbundin meðan malarslitlög teljast til óbundinna slitlaga. Malbik og klæðing teljast til bikbundinna slitlaga sem eru algengustu bundnu slitlögin. Bikbundin slitlög þurfa að hafa næga viðloðun milli steinefna og bindiefna svo ekki komi gat á slitlagið. Við enda slitlagsins í köntum vegarins eru vegaxlir (Vegagerðin, 2016).

Varðandi vegagerð í mýrlendi þá er uppbygging vegarins eins og sú sem hér var áður lýst en það sem er frábrugðið er að hluti fyllingarefnisins sígur ofan í vegstæðið. Fyllingarefni hreinlega tapast vegna sigsins og oft þarf að fergja vegi til þess að ná fram sigi áður en þeir eru teknir í notkun. Því verður hér á eftir vikið nánar að því hvernig staðið er að lagningu vega um mýrlendi.

4 Veglagning um mýrlendi

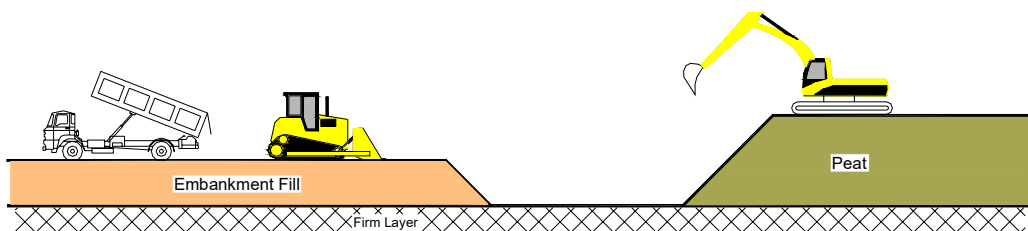
Þegar farið er í hönnun á nýjum vegi eða endurbætur á núverandi vegi ætti að liggja fljótt fyrir hvort landslagið á fyrirhugaðri leið sé mýrlendi eður ei. Ef upp koma þær aðstæður að það þurfi að fara yfir mýri er hægt að grípa til nokkurra aðgerða sem skipta má upp í fimm flokka. Það má forðast mýrlendið, grafa það út, skipta því út, færa það eða skilja það eftir óhreyft. Þessar aðgerðir eiga bæði við mýrar á Íslandi og í nágrennalöndum Íslands; Skotlandi, Noregi, Svíþjóð og Finnlandi sem glíma við sömu vandamál (Munro, 2004).

4.1 Forðun mýrlendis

Ef forðast á (e. avoid) mýrlendið þarf að endurskoða veglínu vegarins og færa hann út úr mýrlendinu sem getur m.a. ollið verri veglínu með tilliti til umferðaröryggis og viðhalds. Kosturinn er hins vegar sá að vegurinn ætti að endast betur til langs tíma lítið. Ef þetta er ekki mögulegt, gæti þurft að grafa mýrina út (Munro, 2004).

4.2 Útgröftur

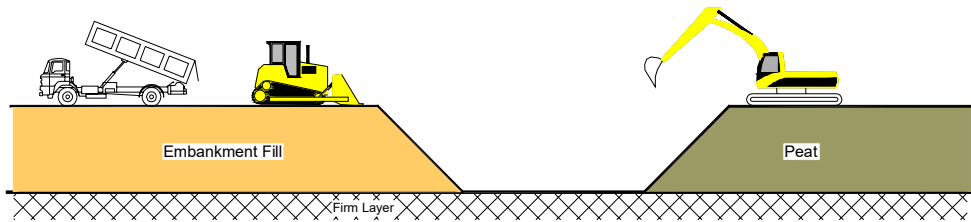
Þegar mýrin er grafinn út (e. peat excavation) þá er grafið niður á burðarhæfan botn og vegfyllingar lagðar ofan á hann sem þó ná yfirleitt ekki hæð umkringjandi lands ef mýrardýptin er mikil, sjá nánar mynd 4.1. Þessi aðferð er notuð við lagningu flestra nýrra stofnvega í Skotlandi, Noregi, Svíþjóð og þeim löndum á norðurhveli jarðar þar sem mýrlendi er til staðar og umferð tiltölulega mikil. Vandamál tengd mýrinni eru að mestu úr sögunni með þessari aðferð, þ.e. ef grafið er niður á burðarhæfan botn. Hins vegar er þessi aðferð ekki hagkvæm fyrir meira dýpi en 3-4 m og heldur ekki þar sem umferð er lítil, sem er tilfellið fyrir marga vegi á Íslandi. Einnig getur kostnaður aukist mjög ef skúfstyrkur skeringarfláa er það lágur að fláarnir renna inn í vegstæðið og auka útgröftinn umtalsvert (Munro, 2004). Þar sem dýr mannvirki eru byggð á mýrlendi, t.a.m. hringtorg og mislæg gatnamót er hagkvæmara að grafa út mýrina til að koma í veg fyrir mismunasig (Haraldur Sigursteinsson, munnleg heimild, 22. janúar 2016).



Mynd 4.1: Útgröftur mýrar (Munro, 2004).

4.3 Útskipti mýrar

Þegar mýrlendi er skipt út (e. peat replacement) er aðferðin að mestu leyti sú sama og við útgröft. Munurinn er hins vegar sá að fyllt er í útgrafna svæðið upp í hæð landsins sem er í kring eða ívið meira, sjá nánar mynd 4.2, miðað við að í fyrri aðferðinni liggur vegurinn að nokkru leyti í skeringu. Þegar farið er í þessa aðferð, sem og aðferðina við útgröft, stendur útaf mikið efnismagn sem þarf að haugsetja og eins þarf mikið magn til fyllinga. Þetta veldur töluverðum kostnaði (Munro, 2004).



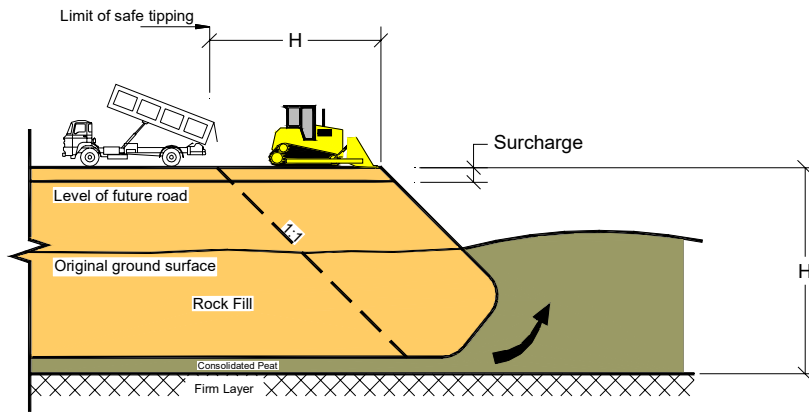
Mynd 4.2: Útskipti mýrar (Munro, 2004).

4.4 Tilfærsla mýrlendis

Þegar talað er um tilfærslu mýrlendis (e. peat displacement) er reynt að haga framkvæmdum þannig að mýrinni sé ýtt til hliðar undan fyllingunni, sjá mynd 4.3. Dýpt mýrarinnar er þá yfirleitt orðin það mikil að ekki er svarandi kostnaðarlega að grafa hana út. Veglagningin fer þannig fram að lögð er fylling, með fargi, ofan á mýrina og hún lögð út smátt og smátt. Þyngd fyllingarinnar og fargsins veldur skúfbroti í mýrinni fyrir framan fyllinguna sem aftur veldur því að hún ýtist í lárétta stefnu til hliðar. Síðan heldur þetta ferli áfram og ryður sig í gegnum mýrlendið. Aðferðin hentar vel þar sem vegur þarf að liggja ofan á hárrí fyllingu og mýrin er vel ummyndað. Fyllingarefnisþörf er hins vegar mikil við þessa aðferð (Munro, 2004).

Afbrigði af þessari aðferð er þegar efsta lag mýrarinnar er fjarlægð framan við fyllinguna. Slík aðferð er helst notuð þegar breidd vegarins er orðin það mikil, sem og dýpt mýrarinnar að erfitt getur verið fyrir fyllinguna að ýta mýrinni út undan sér. Þannig má minnka magnið sem þarf að færa til. Aðferðin getur nýst vel þar sem efra lag mýrarinnar er trefjaríkt en undir því ummyndað mýrarlag (Munro, 2004).

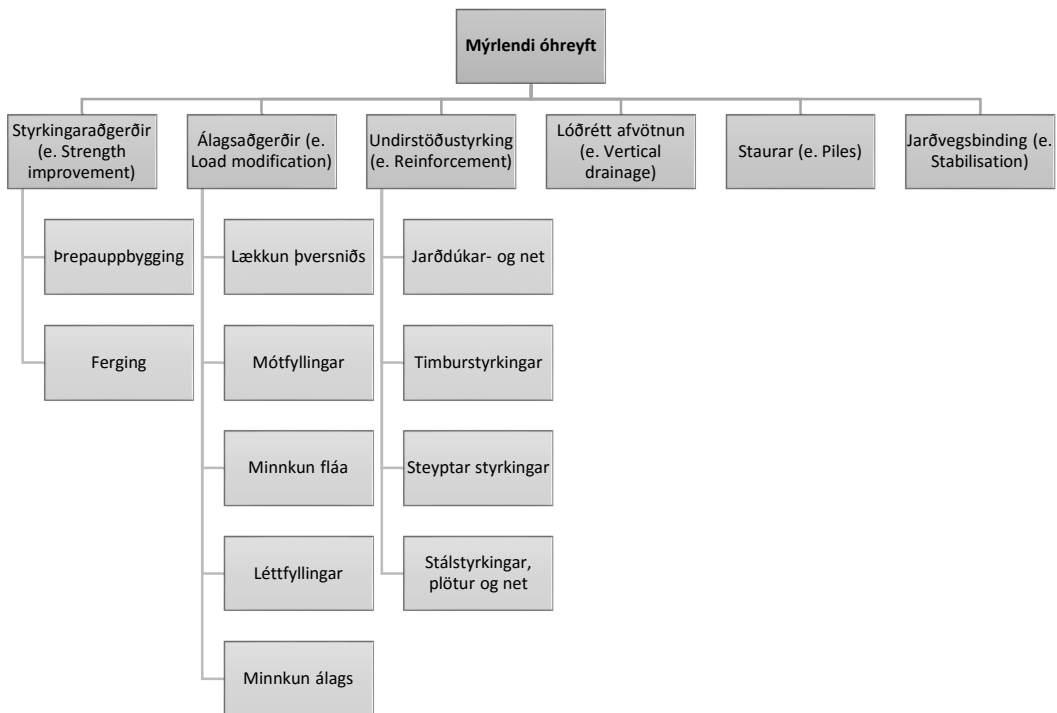
Þriðja afbrigðið af þessari færsluaðferð er aðstoðuð færsla, en þá er mýrinni ýtt af stað með utanaðkomandi aðstoð. Slík aðstoð getur falist í innsprautun vatns eða sprengingum. Ef notast er við vatn, þá er vatnsmagn mýrarinnar fyrir framan fyllinguna aukið tímabundið til þess að lækka skúfstyrk hennar svo auðveldara sé fyrir fyllinguna að komast í gegnum mýrina og koma færslunni af stað. Ef sprengt er, er meðal annars hægt að sprengja við tana á fyllingunni þegar fyllingin er hætt að geta ýtt mýrinni á undan sér. Einnig er hægt að sprengja mýrina undan fyllingunni. Aðferðina er þó ekki ráðlagt að nota nema á opnum svæðum og þar sem önnur úrræði duga ekki til (Munro, 2004).



Mynd 4.3: Tilfærsla mýrlendis (Munro, 2004).

4.5 Óhreyft mýrlendi

Þegar ekki er hreyft við mýrinni (e. peat left in place) er talað um að vegurinn sé fljótandi. Með þessu móti má láta mýrina taka upp burð hægt og rólega. Þetta er sú aðferð sem er að mestu leyti notuð á Íslandi. Þessi aðferð er ódýrari en hinar fyrrgreindu aðferðirnar auk þess sem haugsetning helst í lágmarki. Hægt er að skipta aðferðinni upp í eftirfarandi undirflokk, sjá mynd 4.4.



Mynd 4.4: Upptalning á þeim aðgerðum sem hægt er að framkvæma þegar mýrlendi er óhreyft (Munro, 2004).

4.5.1 Styrkingaraðgerðir

Ef jarðvegurinn er látinn taka upp burð hægt og rólega er möguleiki á að gera það með þrepauppbyggingu eða fergingu. Þegar stuðst er við þrepauppbyggingu eru lögð út þunn fyllingarlæg. Fyrsta lagið er haft það þykkt að það beri vinnuumferð en þó ekki það þykkt að skúfbrot myndist í mýrinni. Næstu lög þar á eftir eru lögð eftir því hversu hratt mýrin losar sig við vatn svo burðargeta hennar og skúfstyrkur aukist. Hægt er að meta slíkt afrennsli með því að mæla hversu mikið mýrin hefur sigið miðað við upphaflega sigspá. Er yfirleitt miðað við að leggja út næstu lög þegar 50-90% þétting í mýrinni hefur átt sér stað. Þannig er vegurinn byggður upp þangað til hann er kominn í rétta hæð. Hentugast er að nota þessa aðferð þar sem mýrin er trefjarík og lek en ef hún er meira ummynduð þarf hvert og eitt þrep lengri tíma (Munro, 2004).

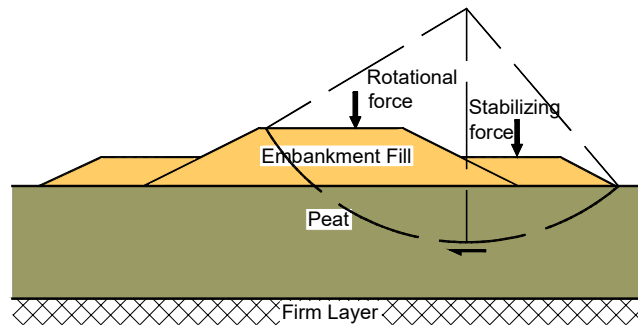
Oftast er þó einnig notast við farg, sem er þá lagt beint ofan á fyllinguna sem var lögð á í þrepum. Fargið er sömuleiðis lagt á í þrepum og er það aðallega gert til þess að hraða þéttingu í mýrinni og þannig ná fram langtímasigi í veginum á skömmum tíma svo sig að loknum framkvæmdatíma verði óverulegt. Í einföldu máli á álag fargsins að vera hærra en það álag sem vegurinn þarf að þola á líftíma sínum, oftast 20 ár. Þegar áætluðu sigi hefur verið náð fram með farginu er það tekið af og efri lög vegarins lögð út. Tími fergingar er oftast nær á bilinu fimm mánuðir upp í eitt ár. Efnið sem notað er í fargið er oftast nær það efni sem nota á í vegbygginguna annars staðar. Kostnaðarauki vegna efnisins í fargið er því lítill miðað við kostnað verksins í heild sinni. Ferging er hagkvæm fyrir mýrardýpt allt að fjórum metrum. Ef dýptin er meiri tekur ferlið lengri tíma. Magn fergingar er háð mörgum þáttum eins og rakainnihaldi, grunnvatnsstöðu, álagsdreifingu og gerð og dýpt mýrar (Munro, 2004).

4.5.2 Álagsaðgerðir

Álagsaðgerðir miða að því að breyta álagsdreifingu nýs vegar svo það henti betur upprunalegum styrk mýrarinnar.

Það fyrsta sem hægt er að grípa til er lækkun þversniðs, þ.e. kóti yfirborðs vegarins er lækkaður svo álag frá vegbyggingunni á undirliggjandi mýri lækkar. Er slík aðgerð yfirleitt framkvæmd á hönnunarstigi (Munro, 2004).

Annað úrræði sem má grípa til er mótfylling en þá eru fyllingar lagðar beggja vegna vegfyllingarinnar sjálfar svo breidd undirstöðu vegarins aukist, og þar með eykst það svæði sem álag frá veginum dreifist á, sjá nánar mynd 4.5. Slík fylling eykur öryggisstuðul vegna mögulegs skriðs fyllingarinnar. Hægt er að nota hvaða efni sem er í slíka mótfyllingu en best er að standa að gerð slíkra mótfyllinga á sama hátt og fylling vegarins er lögð út (Munro, 2004).



Mynd 4.5: Mótfilling á veg og brothingur vegna skriðs fyllingar (Munro, 2004).

Einnig er hægt að minnka halla á fláum vegarins til þess að breikka álagsflöt vegarins svo álagið dreifist betur. Þetta veldur því að meira landrymi fer undir veginn og heildarþyngd fyllingarinnar eykst. Á móti kemur að stöðugleikinn eykst sem er það sem verið er að sækjast eftir (Munro, 2004).

Svokallaða léttfyllingu má síðan nota til þess að létta þyngd fyllingar vegarins og þannig minnka spennur í undirstöðu vegarins. Oftast er lagt farg á veginn þegar þessi aðferð er notuð til þess að flýta sigi og skilja veginn eftir á styrkri undirstöðu þegar áætluðu sigi er lokið. Léttfyllingar eru dýrar og því aðeins notaðar þar sem aðrar ódýrari aðferðir eru ekki tiltækar. Dæmi um efni notað í slíkar fyllingar er til dæmis flugaska (e. pulverised fuel ash), slag (e. slag), vikur, börkur, pólýester, dekkjaúrgangur og útþandur leir (e. lightweight expanded clay aggregates) (Munro, 2004).

Ef álag er minnkað (e. offloading) er þungt efni úr núverandi vegbyggingu skipt út fyrir léttara efni. Þannig má draga úr álagi á mýrina niður fyrir núverandi burðargetu hennar. Yfirleitt er miðað við að minnka álagið um þriðjung eða allt að helming af upprunalegri þyngd fyllingarinnar. Vegur sem er byggður upp með þessum máta má búast við því að vera að mestu leyti laus við sig á líftíma sínum (Munro, 2004).

4.5.3 Styrking undirstöðu

Þegar undirstaða fyllingar er styrkt er helst notast við jarðdúka, jarðnet, timbur- og stálstyrkingar sem og steypar styrkingar (Munro, 2004).

Jarðdúkur styður við stöðugleika fyllingar á framkvæmdatíma með því að dreifa álagi á yfirborðið meðan undirstöðujarðvegurinn er að ná upp styrk til þess að standa undir álaginu. Dúkinn má líta á sem tímabundna aðstoð til þess að aðstoða mýrina við að taka upp álag frá fyllingunni. Á Íslandi er yfirleitt ekki þörf fyrir notkun jarðdúka þar sem mýrin er það trefjarík og sterk efst að það lag virkar líkt og jarðdúkur gerir í ummyndaðri mýri. Jarðnet hefur svipaða virkni og jarðdúkur en það auðveldar dreifingu álags og minnkar mögulegt mismunasig (Munro, 2004).

Með timburstyrkingu er timbur lagt yfir mýraryfirborðið svo álagið dreifist betur og mýrin getur byggt upp styrk til þess að taka á móti álaginu. Einnig kemur slík timburlagning í veg fyrir skúfbrot í mýrinni (Munro, 2004).

Steyptar styrkingar felast í því að leggja steypa fleka ofan á mýrina. Helst er notast við freydda steypu en þá er bætt í hana froðu, aðallega til að minnka rúmþyngd hennar (Munro, 2004).

Í stálstyrkingar eru einna helst notaðir stálkassaprófilar, oft 7 mm að þykkt með sinkhúð. Þeir eru ýmist lagðir þversum eða langsum á veginn en þeir sem lagðir eru þversum hafa gefið góða raun gagnvart burðarþoli og hjólfaramyndun. Þá kemur fyrir að notuð séu stálnet en þau eru af svipuðu meiði og jarðnetin, þau auka stífleika vegarins, dreifa álagi og binda vegbygginguna saman (Munro, 2004).

4.5.4 Lóðrétt afvötnun

Markmiðið með lóðréttri síun, eða afvötnun, er það að stytta afvötnunarleiðir í mýrarjarðveginum svo hraða megi aðalþéttingarferlinu og þannig hraða styrktaraukningu mýrarinnar. Fer framkvæmdin þannig fram að jarðdúksbönd eru rekin lóðrétt ofan í jarðveginn í gegnum yfirborðslag sem afvatnar sig vel og virkar sem lárétt afvötnunarlag. Lóðrétt afvötnun þarf oftast nær einungis að nota þegar um er að ræða ummyndaða mýri og sér í lagi þegar lagið undir mýrinni er þykkt leirlag. Trefjaríkar mýrar hafa hins vegar það mikla lekt að ekki er þörf á slíkum aðgerðum (Munro, 2004).

4.5.5 Staurar

Ekki er notast við staura nema þar sem afar mikilvægt er að halda sigi í lágmarki. Aðferðin er dýr og því ekki víða notuð nema einna helst við aðkomur að brúm. Hægt er annars vegar að reka niður steypa staura eða timburstaura og hins vegar að bora ofan í jarðveginn, grauta jafn óðum og borkrónan er dregin upp og styrkja með járnum þegar borkrónan er komin upp. Staurunum er síðan lokað að ofan með steypu loki, heilsteypu loki eða samsetningu steypst loks og jarðdúks sem tekur við álagi frá vegi og dreifir niður í staurana (Munro, 2004).

4.5.6 Jarðvegsbinding

Með þessari aðferð er reynt að styrkja undirliggjandi jarðveg til þess að auka burðargetu hans og auka stöðugleika fyllingarinnar. Mýrin er blönduð saman við sementskennt bindiefni og þannig verður mýrin að stífum og stöðugum massa. Aðferðin hentar vel þar sem gerðar eru ríkar kröfur til vegagerðar (Munro, 2004).

Þó að hér sé búið að nefna fjöldann allan af aðferðum sem hægt er að nýta við veglagningu um mýrlendi þá er lítill hluti þessara aðferða notaður á Íslandi. Fjallað verður um þá aðferð sem er mest notuð af Vegagerðinni á Íslandi hér í kjölfarið.

4.6 Aðferð íslensku Vegagerðarinnar

Íslenskar mýrar eru töluvert lekari en mýrar í nágrannlöndum Íslands vegna aukins steinefnamagns og öskulaga. Það atriði eitt og sér, auk þess að vegir á Íslandi eru fáfarnir í hinu stóra samhengi veldur því að hægt er að útiloka margar af þeim aðgerðum sem nefndar hafa verið.

Sú aðferð sem mikið hefur verið notuð hér á landi er að láta vegina fljóta á mýrinni, það er að segja að hreyfa ekki við mýrinni. Þá hefur helst verið notuð þrepauppbygging og/eða fering. Fyrst af öllu er lögð áhersla á það að halda núverandi mýrarjarðvegi óhreyfðum, sem er oftast trefjaríkur, þar sem hann gefur góðan styrkingargrunn. Ef mýrin er meira ummynduð mætti hugsa sér að setja jarðvegsdúk ofan á mýrina áður en fyllingarvinna hæfist. Áður en framkvæmdir hefjast er reynt að ná grunnvatnsyfirborðinu stöðugu með því að grafa skurði sitt hvorum megin við áætlaðan veg, um það bil 15-17 m frá miðlínu tveggja akreina vegar. Síðan er notuð þrepauppbygging og fyrsta lag sett út með ekki hærra álagi en 20 kPa. Næstu lög þar á eftir mega ekki vera með hærra álag en 30 kPa hvert. Hvert og eitt lag þarf að hafa náð að minnsta kosti 50% þéttingu áður en næstu lög eru lögð út, þ.e. mýrin þarf að hafa sigið um 50% af áætluðu skammtímasigi miðað við gefið álag áður en það má setja út næsta lag. Þar sem mýri þéttist yfirleitt hratt geta liðið nokkrir dagar upp í fáeinar vikur á milli þess sem má leggja út fyllingarlögin (Munro, 2004).

En hvernig hægt sé að ákvarða magn hvers lags eða feringar fer eftir því hversu mikið mýrin þolir hverju sinni og hve lengi hún er að ná jafnvægi eftir slíka álagsaukningu. Þá er komið að markmiði næstu tveggja kafla sem felst í sigútreikningum og athugun á skúfstyrk mýrarjarðvegs.

5 Sigútreikningar

Við útreikninga á sigi hafa margar aðferðir verið þróaðar en sú aðferð sem notið hefur vinsælda hér á landi er kennd við norska jarðtækniverkfræðinginn og prófessorinn Nilmar Janbu (Grande og Senneset, 2015). Janbu kom fram með nýstárlega aðferð við reikninga á sigi í kringum 1970 og verður henni lýst hér á eftir, með áherslu á mýrarkenndan jarðveg.

5.1 Helstu tegundir sigs

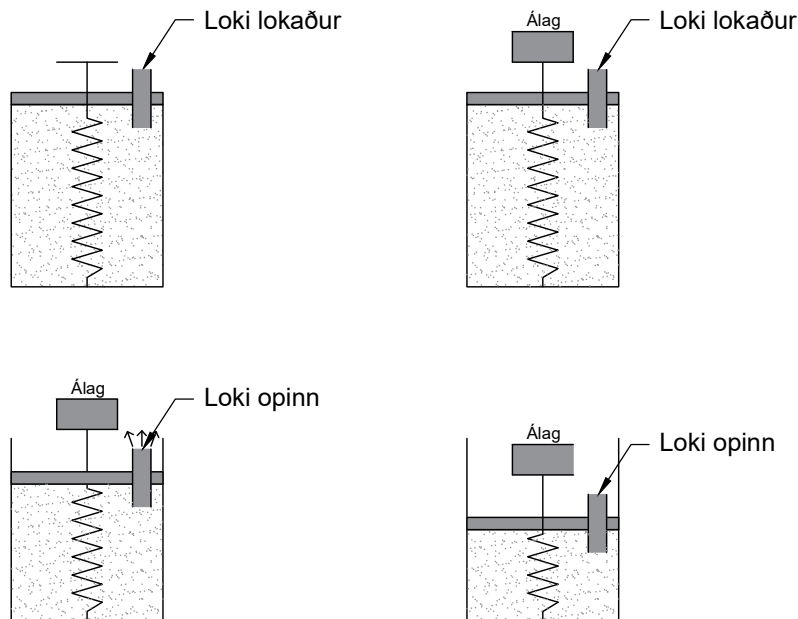
Sig í jarðvegi má skipta niður í þrjá hluta. Þeir eru frumsig, skammtímasig, einnig nefnt aðalsig og langtímasig, einnig nefnt aukasig. Sigið er hægt að reikna með eftirfarandi jöfnu (Das og Sobhan, 2014):

$$s_T = s_e + s_p + s_s \quad (5.1)$$

Þar sem s_T stendur fyrir heildarsig (e. total settlement), s_e fyrir frumsig (e. elastic) sig, s_p fyrir skammtímasig (e. primary consolidation settlement) og s_s fyrir langtímasig (e. secondary consolidation settlement).

Fjaðrandi sig kemur til vegna fjaðrandi formbreytinga í jarðvegi án neinna breytinga í rakainnihaldi. Sigið á sér stað strax í kjölfar álagsaukningar á jarðveg. Þetta sig hefur í raun og veru litla þýðingu fyrir vegi. Hins vegar er hægt að reikna sigspá fyrir önnur mannvirki grunduð í slíkum jarðvegi, til dæmis undirstöður brúa eða stoðveggja (Das og Sobhan, 2014).

Skammtímasig orsakast af rúmmálsbreytingu í vatnsmettuðum samloðandi jarðvegi vegna vatns sem þrýstist út úr holrýmum jarðvegsins, kallað þétting (e. consolidation). Vatnið í jarðveginum tekur upp hluta álagsins til að byrja með og síðan yfirfærir það yfir á jarðvegstrefjarnar. Þetta veldur því að vatnið pressast út og jarðvegurinn sígur (Das og Sobhan, 2014). Hægt er að útskýra þéttingarferlið á einfaldan og myndrænan hátt eins og sýnt er á mynd 5.1.



Mynd 5.1: Líkingarmynd sem sýnir ferli þéttingar, líkt og skammtímasig í jarðvegi, byggt á Das og Sobhan (2014).

Mynd 5.1 sýnir hólk með gormi, viðnámslausum stimpli og loka. Hólkurinn er síðan fylltur með vatni. Þetta lýsir aðstæðum á myndhlutanum efst til vinstri. Á myndhlutanum efst til hægri sést þegar búið er að setja álag á stimpilinn og lokinn er lokaður. Þá er allt álagið tekið upp af vatninu og vatnsþrýstingurinn eykst því sem nemur álaginu. Þegar lokinn er síðan opnaður, myndhluti neðst til vinstri, streymir vatnið út sökum hárs vatnsþrýstings. Álagið sem vatnið tók áður upp yfirfæririst nú á gorminn og hann pressast saman. Að lokum, neðst til hægri, má sjá þegar kerfið hefur náð jafnvægi, sem þýðir að yfirþrýstingur vatnsins er enginn (Das og Sobhan, 2014).

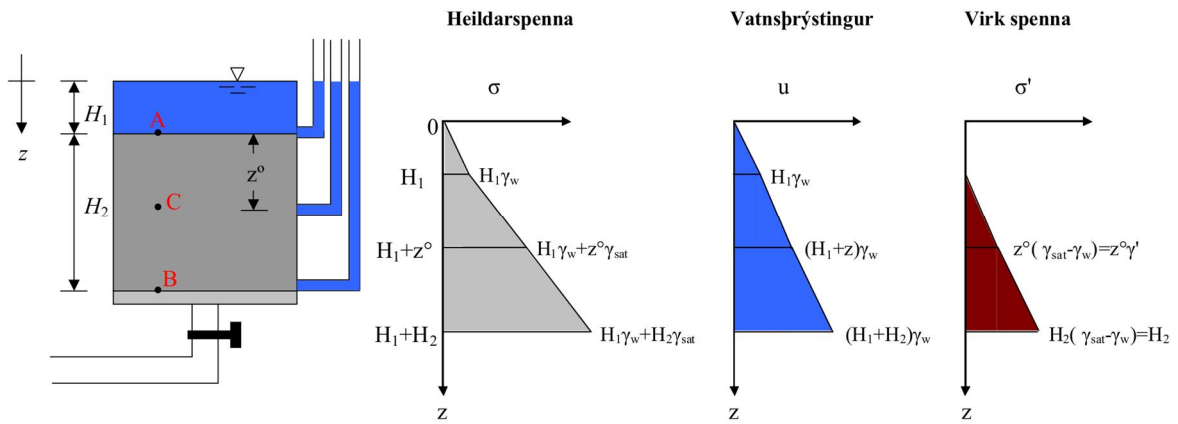
Langtímasig er það sig sem kemur fram eftir að vatnsþrýstingur frá álagsbreytingu hefur jafnast út, sem gerist við lok skammtímasigs. Það kemur til vegna plastískra formbreytinga eða skriði í uppbyggingu trefjanna í jarðefnunum í jarðveginum. Þessi tegund samþjöppunar gerist við stöðuga virka spennu (Das og Sobhan, 2014). Slíkt sig í lífrænum jarðvegi, til að mynda múrum, getur verið umtalsvert. Hér á eftir verður nánar vikið að þeim kenningum sem lúta að reikningum á skammtíma- og langtímasigi.

5.2 Jarðvegsspennur

Til þess að geta leyst og greint vandamál er varða sig er nauðsynlegt að vita hvernig spennur í jarðvegi dreifast. Upp úr þriðja áratug síðustu aldar lagði Karl von Terzaghi fram kenningu sína um virkar spennur í jarðvegi, þ.e. (Das og Sobhan, 2014):

$$\sigma = \sigma' + u \quad (5.2)$$

Þar sem σ stendur fyrir heildarspennu jarðvegs, σ' fyrir virka spennu jarðvegs og u fyrir vatnsþrýsting í jarðvegi, sjá nánar mynd 5.2.



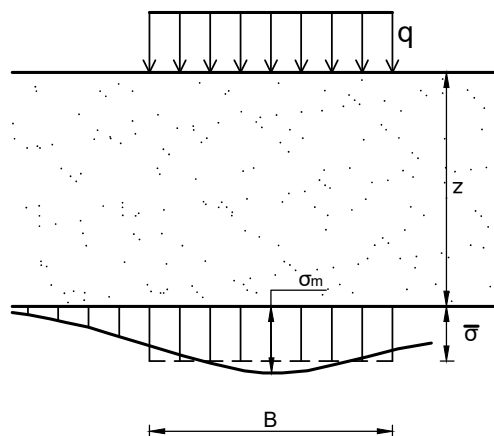
Mynd 5.2: Samspil heildarspennu, vatnsþrýstings og virkrar spennu í vatnsmettuðum jarðvegi (Sigurður Erlingsson, 2011).

Heildarspennu má skipta upp í tvo hluta. Hluti af spennunni er borinn af vatninu í holrýmum efnisins en restin er borin af snertiflötum steinefnisins. Virk spenna í jarðvegi er kraftur á flatareiningu sem steinefnin í jarðveginum bera, þ.e. summa lóðréttra krafta sem verka á snertiflötum steinefnanna sem hlutfall af þverskurðarflatarmáli jarðvegssniðsins (Das og Sobhan, 2014).

Virkrar spenna í jarðvegi stjórnar rúmmálsbreytingum og styrk jarðvegsins. Aukning virkrar spennu veldur þannig rúmmálsminnkun jarðvegs. Samþjappanleiki og skúfþol jarðvegs er háð virkri spennu og því er mikilvægt að þekkja spennuástand jarðvegs áður en farið er í reikninga á sigi. Þó eru það ekki eingöngu núverandi spennur í jarðvegi sem þarf að skoða við sigútreikninga því við veglagningu kemur aukið álag á jarðveg sem felst í þyngd fyllingar, mögulegs fargs og umferðar. Slíkt gefur af sér auknar spennur og þarf að skoða hvernig þessar spennur dreifast niður í undirliggjandi jarðveg.

5.2.1 Spennudreifing vegna utanaðkomandi álags

Þegar fylling, og mögulega farg, er lagt ofan á mýrarjarðveg vegna veglagningar verða til auknar spennur í jarðveginum. Franski stærð- og eðlisfræðingurinn Joseph Boussinesq kom fram með aðferð til þess að greina slíkar spennur. Hann gerði ráð fyrir að jarðvegurinn væri fjaðrandi, einsátta (e. isotropic), einsleitur og í óendanlegu hálfrúmi (Murthy, 2002). Spennudreifingu vegna línufyllingar, fyllingar sem er með ákveðna breidd en óendanlega lengd má sjá á mynd 5.3.



Mynd 5.3: Spennudreifing í jarðvegi vegna álags sem verkar ofan á jarðveg samkvæmt Boussinesq, byggt á Janbu (1970).

Boussinesq lagði fram eftirfarandi jöfnu til þess að reikna meðalspennu í jarðveginum (Janbu, 1970):

$$\bar{\sigma} = \frac{2q}{\pi} \cdot \tan^{-1} \frac{B}{z} \quad (5.3)$$

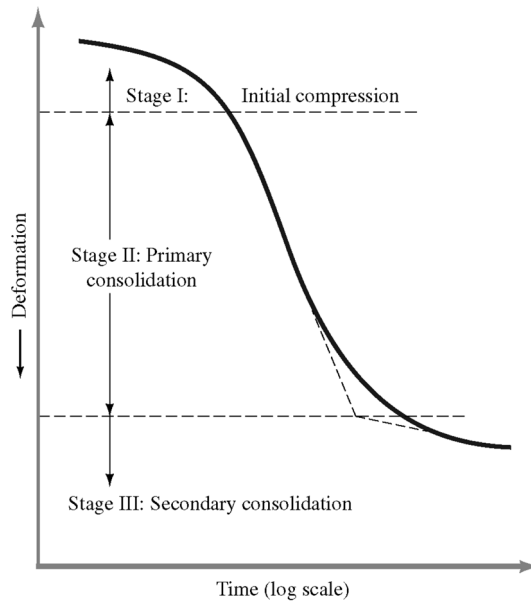
Þar sem q er álag frá fyllingu, B er breidd fyllingar (álagsflatar) og z er dýpi. Þannig verður meðalspenna á 3 m dýpi fyrir fyllingu sem verkar á 15 m breiðan álagsflöt rúmlega 87% af fyllingarspennunni.

Varðandi álag sem kemur ofan á veginn á líftíma hans, það er umferðarálag þá hefur reynst erfitt að reikna það. Hefur verið reynt að nálga áhrif umferðar eins og kyrrstætt álag en það er í raun ekki góður samanburður þar sem umferð er hreyfanlegt álag. Hefur verið reiknað með 0,3 kPa álagi frá umferð á mótum 3 m hárrar vegfyllingar og mýrarjarðvegs (Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson, 1972). Vegna erfiðleika við álagsreikninga umferðarálags og smárrar stærðargráðu er áhrifum umferðarálags sleppt hér.

Nú þegar búið er að leggja fram aðferð við greiningu á spennuástandi jarðvegs og spennureikninga vegna utanaðkomandi álags er hægt að skoða aðferðafræði skammtímasigs.

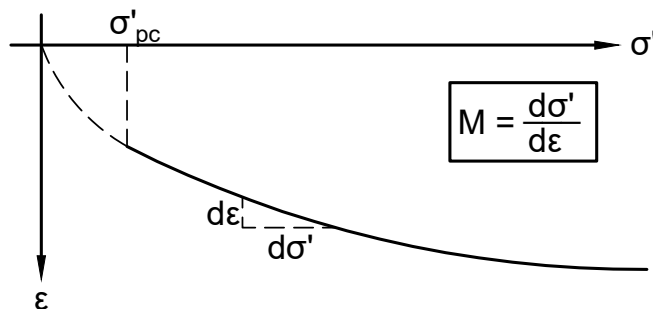
5.3 Skammtímasig

Þegar rætt er um skammtímasig þarf fyrst af öllu að vera búið að kanna jarðefnið með rannsókn á samþjöppunareiginleikum þess. Ein algengasta rannsóknaraðferðin í þeim efnum er próf í ödometertæki. Dæmigerð niðurstaða úr slíku prófi er álag sem fall af tíma, sjá mynd 5.4.



Mynd 5.4: Færsla sýnis sem fall af tíma fyrir tiltekið álagsþrep (Das og Sobhan, 2014).

Ef tekin er heildarfærsla sýnis fyrir öll þau álagsþrep sem keyrð eru á sýnið er hægt að teikna upp færslu sýnis sem fall af virkri spennu sem á það verkar eins og sjá má á mynd 5.5.



Mynd 5.5: Samband virkrar spennu og streitu, byggt á Janbu (1970).

Á mynd 5.5 er merkt inn spennugildið σ'_{pc} sem er forþéttingarspenna efnisins (e. preconsolidation pressure). Forþéttingarspenna er hæsta virka spenna sem tiltekið jarðvegssýni hefur orðið fyrir í sinni jarðfræðisögu. Þetta spennugildi getur verið jafnt eða hærra en sú virka spenna sem ríkti í jarðveginum þegar sýnið var tekið. Ef gildið er hærra getur það komið til að jökull hafi legið ofan á jarðveginum sem síðan hafi hopað eða jarðvegurinn hafi orðið fyrir áhrifum rofs. Þegar athugað er hvort forþéttingarspennan sé hærri eða jöfn núverandi virkri spennu er notað hlutfallið um yfirþrýstingshlutfall (e. overconsolidation ratio), OCR. Það er skilgreint sem (Das og Sobhan, 2014):

$$OCR = \frac{\sigma'_{pc}}{\sigma'_0} \quad (5.4)$$

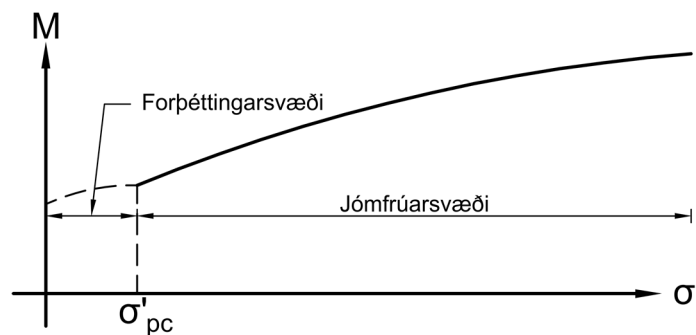
Þar sem σ'_{pc} er forþéttingarspennan eins og áður var nefnt og σ'_0 er núverandi virk spenna í jarðveginum. Ef hlutfallið er í kringum 1 er talað um að jarðvegurinn sé normal-

konsolideraður, þ.e. núverandi virk spenna er sú hæsta sem jarðvegurinn hefur orðið fyrir. Ef hins vegar hlutfallið er >1 er talað um að jarðvegurinn sé yfirkonsolideraður, þ.e. núverandi virk spenna er lægri en sú spenna sem jarðvegurinn hefur orðið fyrir áður. Þúast má við því að eftir því sem yfirþrýstingshlutfall jarðvegs hækkar sigi hann minna heldur en jarðvegur sem er normalkonsolideraður.

Einnig má sjá á mynd 5.5 að sambandið milli spennu og formbreytingar undir einvíðum þrýstingi er almennt séð ólínulegt. Snertill ferilsins er gjarnan táknaður með M og metur spennumótstöðu efnisins (Janbu, 1970):

$$M = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} \quad (5.5)$$

Þá er hægt að teikna upp feril er sýnir samband virkrar spennu og spennumótstöðu sem má sjá á mynd 5.6.



Mynd 5.6: Samband spennumótstöðu og virkrar spennu, byggt á Janbu (1970).

Þar sem virk spenna er lægri en forþéttingarspenna, σ'_{pc} , nefnist svæðið forþéttingarsvæði og er jarðvegurinn þar yfirkonsolideraður. Ef virk spenna er hærri en forþéttingarspenna er talað um jómfrúarsvæði. Ferillinn á forþéttingarsvæðinu er oftast reynt að nálga sem lárétta línu og fæst þá spennumótstaða sem fasti á því bili. Hins vegar er ferillinn á jómfrúarsvæðinu nálgaður sem bein lína, þannig að $M = m \cdot \sigma'$ þar sem m er módultala og hallatala þess hluta ferilsins.

5.3.1 Sig á forþéttingarsvæði

Á forþéttingarsvæðinu er hægt að reikna sigið eins og efnid sé fjaðrandi. Það er hægt vegna þeirrar nálgunar að spennumótstaðan sé fasti á því bili. Einvíða formbreytingu efnisins er þá hægt að reikna með eftirfarandi jöfnu (Janbu, 1970):

$$\varepsilon_{p,pc} = \int_{\sigma'_0}^{\Delta\sigma'} \frac{d\sigma'}{M} = \frac{\Delta\sigma' - \sigma'_0}{M}, \quad \sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_{pc} \quad (5.6)$$

Þar sem $\varepsilon_{p,pc}$ stendur fyrir skammtímaformbreytingu á forþéttingarsvæði, σ'_0 er virk spenna jarðvegs, $\Delta\sigma'$ er aukning í virkri spennu og M er spennumótstaða efnisins.

Þegar búið er að reikna formbreytinguna má reikna skammtímasigið á forþéttingarsvæðinu með eftirfarandi heildi (Janbu, 1970):

$$s_{p.pc} = \int_0^H \varepsilon_{p.pc} dz \quad (5.7)$$

Þar sem $s_{p.pc}$ stendur fyrir skammtímasig á forþéttingarsvæði, dz er þykkt þess lags sem er til skoðunar og H er heildarþykktin.

5.3.2 Sig á jómfrúarsvæði

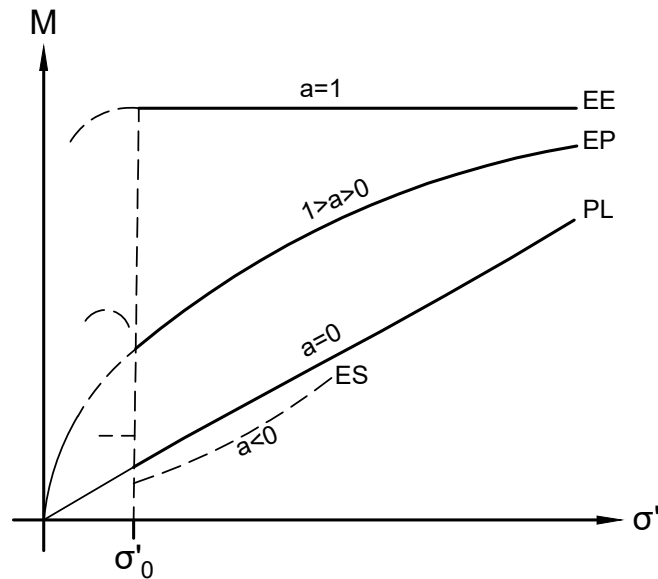
Þegar spennuaukning verður hærri en forþéttingarspenna er hægt að reikna formbreytingu efnisins með eftirfarandi jöfnu (Janbu, 1970):

$$\varepsilon_{p.v} = \int_{\sigma_{pc}'}^{\sigma_{pc}'+\Delta\sigma'} \frac{d\sigma'}{M} \quad (5.8)$$

Það ætti að vera einfalt mál að leysa heildið ef jafna, eða nálgunarformúla fyrir spennumótstöðuna væri þekkt. Nefnt var hér framar að spennumótstaðan væri nálguð línulega með svokallaðri módultölu. Það þarf þó ekki að vera þannig fyrir allar jarðvegsgerðir enda sýndi Janbu fram á það með tilraunum að hægt væri að túlka spennumótstöðuna, almennt séð, með eftirfarandi hætti (Janbu, 1970):

$$M = m \cdot \sigma_a \left(\frac{\sigma'}{\sigma_a} \right)^{1-a} \quad (5.9)$$

Þar sem M er spennumótstaða í kPa, m er einingalaus módultala, a er einingalaus spennustuðull, σ_a er viðmiðunarspenna ($\sigma_a = 100 \text{ kPa}$) og σ' er breytileg virk spenna í stefnu formbreytingarinnar. Við ákvörðun á spennustuðlinum a er hægt að styðjast við mynd 5.7.



Mynd 5.7: Ákvörðun á spennustuðlinum a , byggt á Janbu (1970).

Á mynd 5.7 sést hvernig ferill spennumótstöðunnar lítur út ef spennustuðullinn er núll. Eftir endurteknaðar rannsóknir fékkst það staðfest að fyrir mýrarkenndan jarðveg er spennustuðullinn jafnan nálægt núlli. Janbu lagði fram fjögur mismunandi reiknilíkön fyrir mismunandi gildi á spennustuðlinum. Reiknilíkanið fyrir $a = 0$ telst samkvæmt þeirri flokkun vera plastískt (Janbu, 1970). Þó er hægt að leiða að því líkur að fyrir íslenskan mýrarjarðveg gæti spennustuðullinn legið á bilinu 0 - 0,5 vegna steinefna- og öskulaga í mýrarjarðveginum.

Gildi á spennustuðlum og módultölum eru mismunandi eftir jarðefnum og má sjá yfirlit yfir helstu jarðefni og gildi þeirra í töflu 5.1.

Tafla 5.1: Spennustuðlar og módultölur fyrir mismunandi jarðefni (Sigurður Erlingsson, 2014).

Soil or rock type		Stress exponent a	Modulus number m
Rock	High strength	1	1 000 000 – 1 000
	Low strength	1	1 000 – 300
Tills:	very dense to dense	1	1 000 – 300
Gravel		0.5	400 – 40
Sand	Dense	0.5	400 – 250
	Compact	0.5	250 – 150
	Loose	0.5	150 – 100
Silt	Dense	0.5	200 – 80
	Compact	0.5	80 – 60
	Loose	0.5	60 – 40
Clay-silty	Hard	0	60 – 20
	Stiff	0	20 – 10
	Soft	0	10 – 5
Clay	Marine or organic	0	20 – 5
Peat		0	5 – 1

Fyrir mýrarkenndan jarðveg hafa algeng gildi á módultölunni m því legið á bilinu 1-5.

Með þær upplýsingar að spennustuðullinn sé núll er hægt að stinga því inn í jöfnu (5.9) og fá út:

$$M = m \cdot \sigma' \quad (5.10)$$

Sem segir að spennumótstöðuferillinn vaxi línulega, eins og áður var vikið að.

Með því að stinga jöfnu (5.10) inn í jöfnu (5.8) og leysa heildið fæst eftirfarandi jafna fyrir formbreytingu mýrarjarðvegs á jómfrúarsvæði (Janbu, 1970):

$$\varepsilon_{p.v} = \frac{1}{m} \ln \left(\frac{\sigma_{pc}' + \Delta\sigma'}{\sigma_{pc}'} \right) \quad (5.11)$$

Þar sem $\varepsilon_{p.v}$ er skammtímaformbreyting á jómfrúarsvæði, σ_{pc}' er forþéttingarspenna jarðvegsins og $\Delta\sigma'$ er spennuaukning.

Ef reikna á heildarformbreytingu á jómfrúarsvæði fæst það með:

$$\varepsilon_{p.v} = \frac{\sigma_{pc}' - \sigma_0'}{M} + \frac{1}{m} \ln \left(\frac{\sigma_{pc}' + (\Delta\sigma' - \sigma_{pc}')}{\sigma_{pc}'} \right) \quad (5.12)$$

Þar sem allar stærðir eru eins og áður skilgreindar.

Þegar búið er að reikna formbreytinguna má reikna skammtímasigið á jómfrúarsvæðinu með eftirfarandi heildi (Janbu, 1970):

$$s_{p.v} = \int_0^H \varepsilon_{p.v}(z) dz \quad (5.13)$$

Þar sem $s_{p.v}$ stendur fyrir skammtímasig á jómfrúarsvæði, dz er þykkt þess lags sem er til skoðunar og H er heildarþykktin.

5.4 Tímalengd sigs

Þó að nú sé búið að setja fram aðferðafræði til þess að ákvarða skammtímasig er ekki minna mikilvægt að hafa undir höndum aðferð til þess að reikna tímann sem það tekur sigið að koma fram, þ.e. ákvarða hraða þéttingarinnar. Almenn táknið má segja að sigtími aukist með vaxandi þykkt jarðvegs. Þá verður sigið hægara eftir því hversu háum spennum mýrin hefur náð að aðlagast áður en nýtt álag kemur á hana.

Við álagsaukningu á jarðveg pressast vatn út úr vatnsmettuðum jarðveginum. Þegar nýtt álag kemur á mýrina tekur vatnsmettaður jarðvegurinn upp hluta álagsins og holrýmisþrýstingurinn milli jarðvegstrefjanna eykst. Þegar holrýmisþrýstingurinn minnkar hefst sig en þá leitar vatnið burtu og jarðvegstrefjarnar taka við þrýstingnum. Hvert vatnið fer, fer eftir aðstæðum á hverjum stað fyrir sig en vatnið fer ætíð auðveldustu leiðina. Það getur því farið upp, niður

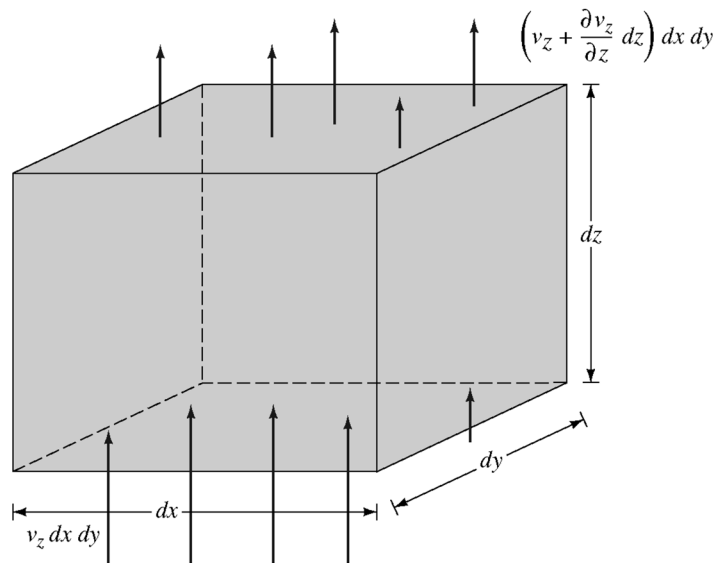
eða til hliðar. Hraða þessa þéttingaferlis er hægt að fá með því að ákvarða svokallaðan þéttingarstuðul.

Terzaghi kom fram með upphaflega kenningu um hraða einvíðrar þéttingar (e. one-dimensional consolidation) í kringum 1925 en Janbu endurbætti þá kenningu. Hann lagði fram nokkur atriði til grundvallar fyrir útleiðslu á sinni kenningu. Þau eru að jarðvegurinn sé samfelldur, lögmál Darcy's gildi, tengsl spennu og streitu fylgi spennumótstöðu (sbr. áður nefnt) og að kenning Terzaghi's um virkar spennur gildi (Janbu, 1970). Aukinheldur að jarðvegurinn sé vatnsmettaður, vatn sé ósamþjappanlegt og jarðvegskorn séu ósamþjappanleg (Das og Sobhan, 2014).

Það að jarðvegurinn sé samfelldur segir að fyrir vatnsmettaðan jarðveg sé vatn pressað úr holrýmum reiknað á rúmmálseiningu jafnt og samþjöppun reiknuð á tíma (Janbu, 1970):

$$\frac{\delta v}{\delta z} = \frac{\delta \epsilon}{\delta t} \quad (5.14)$$

Þar sem v er rennslishraði í gegnum jarðveginn, þ.e. það magn af vatni sem flæðir á tímaeiningu hornrétt í gegnum einingarþversnið af jarðvegi (Sigurður Erlingsson, 2011). Flæði vatns í gegnum jarðvegseiningu er sett fram á mynd 5.8.



Mynd 5.8: Flæði vatns í gegnum smáa jarðvegseiningu (Das og Sobhan, 2014).

Lögmál Darcy's er sett fram sem (Janbu, 1970):

$$v = ki - ki_0 \quad (5.15)$$

Þar sem k er lektarstuðull jarðvegsins og þrýstifall er túlkað sem:

$$i = -\frac{\delta h}{\delta z} = -\frac{\delta u}{\gamma_w \delta z} \quad (5.16)$$

Þar sem γ_w er rúmþyngd vatns.

Þriðja atriðið er sett fram með tilliti til spennumótstöðu efnisins (Janbu, 1970):

$$M\delta\varepsilon = \delta\sigma' \quad (5.17)$$

Að lokum er það fjórða sett fram sem:

$$\sigma' + u = \sigma(z) \quad (5.18)$$

Þannig eru virkar spennur og vatnsþrýstingur í jarðveginum einungis háðar dýpinu en ekki tímanum.

Ef beitt er deildun á jöfnu (5.18) og δu leyst út má stinga því inn í jöfnu (5.16). Með því að beita jöfnu (5.17) og stinga niðurstöðunni inn í jöfnu (5.15) fæst eftirfarandi niðurstaða fyrir flæði vatns í gegnum jarðveg:

$$v = \frac{kM}{\gamma_w} \frac{\delta\varepsilon}{\delta z} - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\delta\sigma(z)}{\delta z} - ki_0 \quad (5.19)$$

Þá er hægt að draga stærðina kM/γ_w saman í nýjan stuðul sem nefnist þéttingarstuðull (e. coefficient of consolidation) og er táknður sem c_v . Stuðullinn er yfirleitt með eininguna $m^2/\text{ár}$ eða $cm^2/\text{mín}$. Má þá einfalda jöfnu (5.19) í eftirfarandi:

$$v = c_v \frac{\delta\varepsilon}{\delta z} - v_0 \quad (5.20)$$

Nýr stuðull sem stendur fyrir þá formbreytingu efnis sem er ólokið er skilgreindur sem (Janbu, 1970):

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_p - \varepsilon \quad (5.21)$$

Þar sem ε_p er skammtímaformbreyting og ε er sú formbreyting sem er lokið í efninu.

Með því að nýta sér það að í lok skammtímasigsins, $t = t_p$, er vatnshraðinn enginn, $v = 0$ og formbreyting jarðvegsins jöfn skammtímaformbreytingunni, $\varepsilon = \varepsilon_p$ er hægt að leysa v_0 út úr jöfnu (5.20). Því má síðan aftur stinga inn í jöfnu (5.20) og með einfölduninni úr jöfnu (5.21) má fá jöfnu sem lýsir vatnshraða í jarðvegi sem verður fyrir þéttingu:

$$v = -c_v \frac{\delta\bar{\varepsilon}}{\delta z} \quad (5.22)$$

Það sem drífur holrýmisvatnið út úr vatnsmettuðum jarðvegi sem verður fyrir þéttingu er því stigull ólokinnar formbreytingar, $\bar{\varepsilon}$, en ekki eingöngu þrýstifall vatnsins eins og lýst var með jöfnu (5.16). Þetta atriði er eitt af þeim sem greinir á milli klassísku þéttingarkenningarinnar og endurbættri útgáfu Janbu.

Þar sem ε_p er óháð tíma má stinga jöfnu (5.21) inn í jöfnu (5.14) og fá:

$$\frac{\delta v}{\delta z} = -\frac{\delta \bar{\varepsilon}}{\delta t} \quad (5.23)$$

Með því að stinga jöfnu (5.22) inn í (5.23) má fá út diffurjöfnu sem lýsir aðalþéttingu jarðvegs með tilliti til tíma:

$$\frac{\delta \bar{\varepsilon}}{\delta t} = c_v \frac{\delta^2 \bar{\varepsilon}}{\delta z^2} \quad (5.24)$$

Með því að gera jöfnu (5.24) einingalaus er hægt að leysa einingalaus jöfnuna fyrir ε og ε_p . Með því að heilda yfir jarðvegsþykktina er hægt að fá samsvarandi lausn fyrir s og s_p .

Þá er hægt að kynna til sögunnar aðalþéttingarhlutfall sem er skilgreint sem (Janbu, 1970):

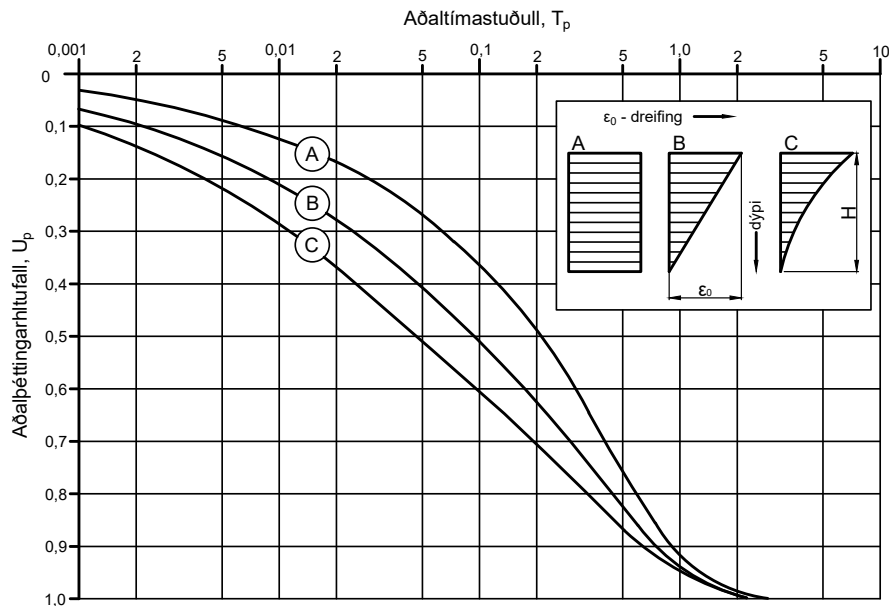
$$U_p = \frac{s}{s_p} \rightarrow s = U_p \cdot s_p \quad (5.25)$$

Þar sem s er sig á tímapunktinum t og s_p er skammtímasig.

Lausn á aðalþéttingarhlutfalli er hægt að skrifa sem (Janbu, 1970):

$$U_p = 1 - 2(1+r) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{N^2} \left(1 - \frac{r \sin N^r}{N^r}\right) e^{-N^2 T_p} \quad (5.26)$$

þar sem $N = ((2n-1)\pi)/2$, $T_p = (c_v/H_{dr}^2)t$ og $r = 0, 1, 2$ eftir tilfellunum A, B, C sem má sjá á mynd 5.9 en þar er sett fram myndræn lausn á þéttingarkenningu Janbu.



Mynd 5.9: Aðalþéttingarhlutfall og aðaltímastuðull fyrir mismunandi dreifingu á formbreytingu, byggt á Janbu (1970).

Á mynd 5.9 er á láréttum ás aðaltímastuðull sem er hægt að skilgreina sem (Janbu, 1970):

$$T_p = \frac{t}{t_p} \quad (5.27)$$

Þar sem T_p er aðaltímastuðull sem fæst út frá ákveðnu aðalþéttingarhlutfalli, U_p , t er tími, og t_p er sá tími sem það tekur skammtímasigið að koma fram. Þann tíma er hægt að nálga með (Janbu, 1970):

$$t_p = \frac{H_{dr}^2}{c_v} \quad (5.28)$$

Þar sem H_{dr} er lengd afrennslisleiðar vatnsins, ef vatnið síast öðrum megin er það þykkt jarðlagsins að öðrum kosti er það helmingur þykktarinnar ef vatnið síast beggja vegna og c_v er þéttingarstuðullinn. Lektarleiðin gegnum jarðvegin ákvarðast af fyrnefndum rennslismöguleikum og ϵ_p dreifingunni sem sést á mynd 5.9 (Janbu, 1970). Þannig er hægt að lýsa siginu í jarðveginum á tímapunktinum t með sambandinu sem sett var fram með jöfnu (5.25).

Þó svo að hér sé búið að leggja fram aðferð til þess að ákvarða skammtímasig með tilliti til tíma er ekki þar með sagt að öllu sigi sé lokið í jarðveginum. Þegar álag er orðið stöðugt fara jarðvegstrefjar í jarðveginum að endurraða sér vegna álagsins og hefst þá langtímasig sem getur verið umtalsvert fyrir mýrarjarðveg.

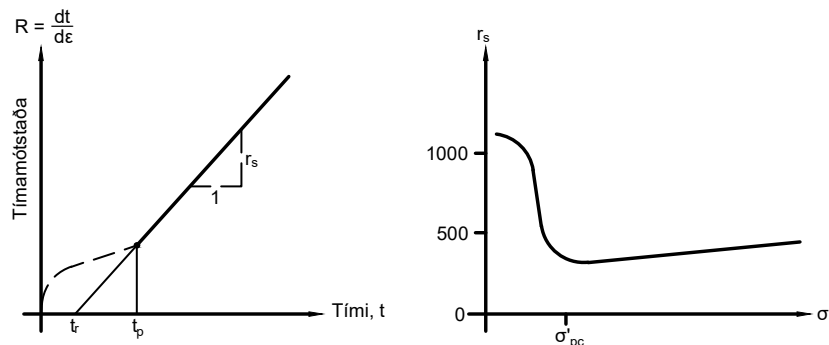
5.5 Langtímasig

Aðferðafræðin á bak við langtímasig er nokkuð frábrugðin þeirri sem beitt er við skammtímasig. Langtímasigið er óháð spennu og kemur í kjölfar skammtímasigs. Janbu kom

með nýstárlega aðferð til að eiga við þetta vandamál. Á sama hátt og hann skilgreindi spennumótstöðu fyrir skammtímasig, skilgreindi hann tímamótstöðu fyrir langtímasig. Þannig er tímamótstaðan skilgreind sem hlutfallið á milli breytingar á tíma og breytingar á formbreytingu, eða (Janbu, 1970):

$$R = \frac{dt}{d\varepsilon} \quad (5.29)$$

Tímamótstöðukenningu Janbu's má sjá myndrænt á mynd 5.10.



Mynd 5.10: Tímamótstaða sem fall af tíma og tímamótstöðustuðull sem fall af virkri spennu, byggt á Janbu (1970).

Út frá prófunum reyndist tímamótstaðan vera línuleg fyrir tilvikið $t > t_p$, sjá mynd 5.10 og er þá hægt að túlka hana með eftirfarandi jöfnu (Janbu, 1970):

$$R = r_s(t - t_r), \quad t > t_p \quad (5.30)$$

Þar sem r_s er einingalaus tímamótstöðustuðull og t_r er viðmiðunartími. Þá sést einnig að skammtímasigið, táknað með brotalínu, er með fleygbogalögun en það er í samræmi við það að fræðilega séð á sigið að vera í réttu hlutfalli við kvaðratrótina af tímanum (Janbu, 1970).

Hægra megin á mynd 5.10 sést að tímamótstöðustuðullinn er frekar hár á forþéttingarsvæðinu en á jómfrúarsvæðinu hefur tímamótstöðustuðullinn lækkað töluvert en vex hægt. Þannig er m.a. hægt að nota slíka niðurstöðu til þess að ákvarða forþéttingarspennuna í jarðveginum (Janbu, 1970).

Þegar jöfnur (5.29) og (5.30) eru settar saman fæst eftirfarandi samband fyrir tímamótstöðu (Janbu, 1970):

$$\frac{dt}{d\varepsilon} = r_s(t - t_r) \quad (5.31)$$

Fært yfir og einfaldað:

$$d\varepsilon = \frac{1}{r_s} \cdot \frac{dt}{t - t_r} = \frac{1}{r_s} \cdot \frac{d(t - t_r)}{t - t_r} \quad (5.32)$$

Með því að heilda báðum megin fæst út að langtímaformbreytingin er:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{r_s} \cdot \ln \frac{t - t_r}{t_p - t_r} \quad (5.33)$$

Þá er hægt að leiða út samband fyrir aukapéttingarhlutfall og langtímaformbreytingu sem (Janbu, 1970):

$$U_s = \varepsilon_s \cdot r_s \rightarrow \varepsilon_s = \frac{U_s}{r_s} \quad (5.34)$$

Einnig er kynntur til sögunnar aukatímastuðull sem er skilgreindur sem (Janbu, 1970):

$$T_s = \frac{t}{t_p} \quad (5.35)$$

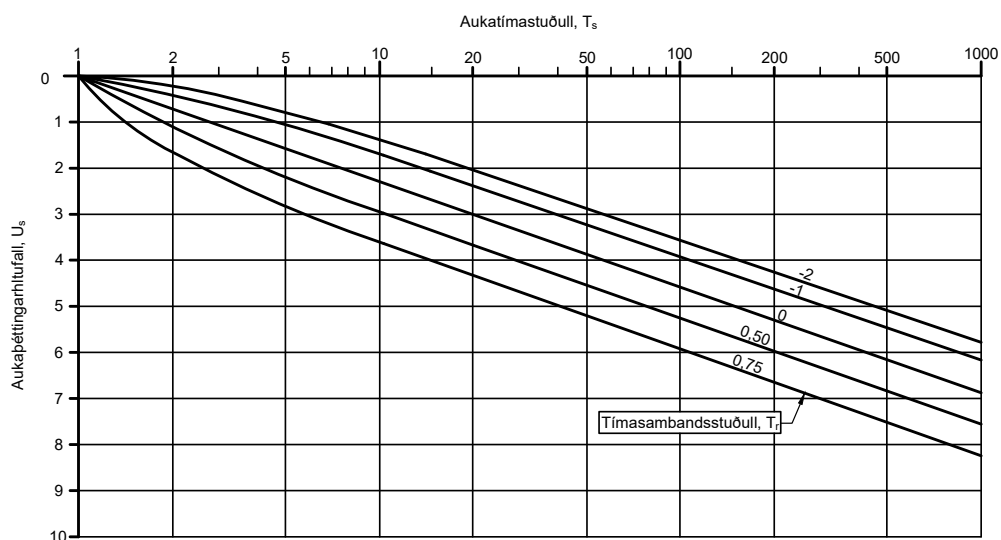
Þá fæst tímasambandsstuðull á milli viðmiðunartímans t_r og aðaltímans t_p sem (Janbu, 1970):

$$T_r = \frac{t_r}{t_p} \quad (5.36)$$

Þá er hægt að umrita jöfnuna fyrir aukapéttingarhlutfallinu sem:

$$U_s = \ln \frac{T_s - T_r}{1 - T_r}, \quad T_s \geq 1 \quad (5.37)$$

Eins má sjá jöfnuna teiknaða upp myndrænt fyrir mismunandi gildi á tímasambandsstuðli á mynd 5.11.



Mynd 5.11: Aukapéttingarhlutfall sýnt sem fall af aukatímastuðli fyrir mismunandi gildi á tímasambandsstuðli, byggt á Janbu (1970).

Í því tilfalli þegar $T_r = 0$ verður tímamótstaðan línuleg, $R = r_s \cdot t$ og þar með $U_s = \ln T_s$. Það er að segja, langtímasigið er í réttu hlutfalli við logrann af tímanum. Fyrir flestar jarðvegsgerðir, þar með talið mýri er $t_r \cong 0$ og þar af leiðandi $T_r \cong 0$ (Janbu, 1970).

Langtímasigið er þá hægt að reikna með jöfnunni (Janbu, 1970):

$$s_s = \int_0^H \varepsilon_s dz \quad (5.38)$$

Þar sem s_s stendur fyrir langtímasig, ε_s er langtímaformbreyting, dz er þykkt þess lags sem er til skoðunar og H er heildarþykktin.

5.6 Sigreikningar

Í forritinu *Matlab* voru skrifaðir nokkrir kóðar sem reikna sig samkvæmt aðferðafræði Janbu og verða þeir notaðir í sigreikningum í þessari ritgerð. Kóði sem reiknar skammtímasig tekur inn fyllingaralag, forþéttingarspennu jarðvegs, virka spennu jarðvegs, spennumótstöðu og móduþölu og skilar af sér hlutfallslegri formbreytingu jarðvegs.

Kóði sem reiknar langtímasig tekur inn þéttingartíma (konsolideringstíma), þykkt mýrar, viðmiðunartíma og tímamótstöðutölu og skilar af sér annars vegar 20 ára langtímasigi og hins vegar langtímasigi fyrir gefinn tímavigur.

Til þess að reikna sig og þéttingartíma fyrir gefið þversnið var útbúinn kóði sem tekur inn rúmþyngd rakrar og vatnsmettaðrar fyllingar, þykkt fyllingar, rúmþyngd mýrar, þykkt mýrar, kóta grunnvatnsyfirborðs og breidd akbrautar. Út frá áður nefndum kóðum var unnt að reikna sig með þrepauppbyggingu. Kóðana má nálgast í viðauka A.

6 Skúfstyrkur

Skúfstyrkur jarðvegs er innri mótstaða jarðefnis á einingarflatarmál sem jarðefni getur veitt gegn broti eða skriði eftir sérhverjum fleti innan þess (Das og Sobhan, 2014). Skúfstyrkur jarðvegs er undirstaða þess að hægt sé að greina t.d. stöðugleika fyllinga á mýrlendi.

6.1 Mohr-Coulomb brotlíkingin

Upp úr aldamótunum í kringum 1900 kom Christian Otto Mohr fram með kenningu sína um brot í efnum, þ.e. að efni gefi eftir vegna krítíks sambands normalspennu og skúfspennu. Charles-Augustin de Coulomb kom fram með líkingu sem segir hvernig áætla megi skúfspennu í brotfloti sem línulegt fall af normalspennu. Mohr-Coulomb brotlíkinguna má skrifa sem (Das og Sobhan, 2014):

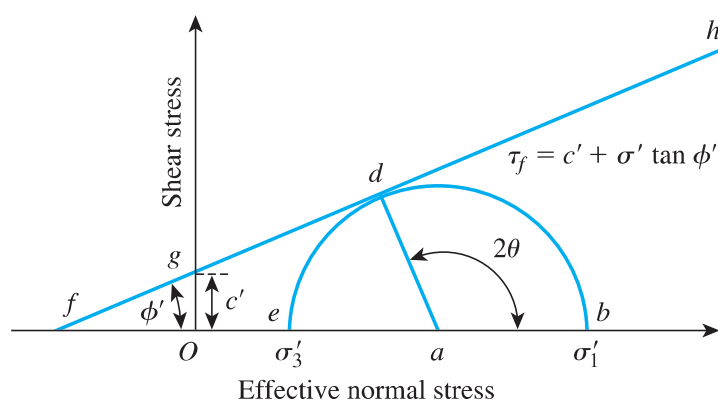
$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (6.1)$$

Þar sem c er samloðun jarðefnis, φ er viðnámshorn jarðefnis, σ er normalspenna hornrétt á brotflöt og τ_f er skúfstyrkur.

Jafna (6.1) túlkar skúfstyrk út frá heildarspennu en ef túlka á skúfstyrkinn í vatnsmettuðum jarðvegi þarf að gera það út frá virkum spennum. Þá verður brotlíkingin (Das og Sobhan, 2014):

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (6.2)$$

Þar sem samloðunin, viðnámshornið og normalspennan byggir á virkum spennum jarðefnis. Jafna (6.2) gildir fyrir framræst (e. drained) ástand en þá verður engin breyting í holrýmisþrýstingi við utanaðkomandi álag og vatn kemst auðveldlega út úr holrýmum jarðefnis. Brotlíkinguna má sjá á mynd 6.1.



Mynd 6.1: Mohr-Coulomb brotlíkingin (Das og Sobhan, 2014).

Brotflöturinn á mynd 6.1 takmarkast af línunni fgh. φ' og c' er sem fyrr viðnámshorn og samloðun jarðefnis og σ'_1 og σ'_3 eru höfuðspennur efnisins.

Ef vatn í holrýmum jarðefnis kemst ekki út úr efninu verða aðstæðurnar óframræstar (e. undrained) og má þá túlka skúfstyrkinn sem (Das og Sobhan, 2014):

$$\tau_f = c_u \quad (6.3)$$

Þar sem c_u er óframræstur skúfstyrkur samloðunarefnis.

6.2 Ákvörðun skúfstyrks

Til eru nokkrar gerðir af rannsóknarstofuprófum til þess að ákvarða þá efniseiginleika sem skúfstyrkur byggir á, þ.e. samloðun og viðnámshorn. Má þar nefna skúfboxpróf, þríásapróf og einásapróf en fyrrnefndu tvö prófin eru hvað mest notuð til ákvörðunar á efniseiginleikum. Til þess að ákvarða óframræstan skúfstyrk er hægt að nota einása- og þríásapróf. Fæst hann með því að taka meðaltal hæstu og lægstu höfuðspennu sýnis (Das og Sobhan, 2014). Gildir það samband meðan jarðefnið er vatnsmettað og engin framræsing á sér stað í því (Sigurður Erlingsson, 2011). Fyrir mýrarjarðveg er það erfiðleikum háð að öðlast upplýsingar um skúfstyrk og verður fjallað um það í næsta undirkafla.

6.2.1 Skúfstyrkur mýrar

Þeir þættir sem ráða mestu um skúfstyrk mýrar eru rakainnihald, ummyndunarstig og steinefnainnihald. Ef rakainnihald er hátt verður skúfstyrkurinn lægri, mikil ummyndun veldur lægri skúfstyrk og hátt steinefnainnihald veldur hærri skúfstyrk. Erfitt hefur reynst að ákvarða skúfstyrk sýna í rannsóknarstofu vegna þess að erfitt er að ná dæmigerðu sýni úti í mörk og koma því fyrir óspilltu í rannsóknartæki (Munro, 2004).

Þess í stað hefur verið farin sú leið að gera einföld próf úti í feldi sem gefa til kynna hver skúfstyrkurinn sé. Meðal annars hefur verið notast við vængjapróf (e. vane shear test) en það hefur þó ekki reynst nógu vel í lítt ummyndaðri mýri þar sem oft reynast vera lurkalög í mýrinni (Munro, 2004). Því ber að taka slíkum niðurstöðum með fyrirvara.

Niðurstöður prófunar á normalkonsolideraðri, trefjaríkri og meðal ummyndaðri mýri í Escuminac, Nýju-Brúnsvík í Kanada gáfu til kynna $c' = 2,4 - 4,7 \text{ kPa}$ og $\varphi' = 27 - 32^\circ$ fyrir normalspennu hærri en 13 kPa. Með lækkaðri normalspennu hækkaði samloðunin en viðnámshornið lækkaði vegna samtunnunar trefja í mýrinni. Þá mátti sjá að fyrir yfirkonsolideruð sýni af sama stað reyndist samloðunin hærri og viðnámshornið lægra heldur en fyrir normalkonsolideruð sýni (Landva og La Rochelle, 1983).

6.3 Stöðugleiki fláa

Skilgreina má fláa sem það yfirborð sem hallar frá láréttum fleti. Flái getur brostið á nokkra vegu en hér verður sjónum aðallega beint að skriði vegna brests í jarðefninu. Fláar geta skriðið fram ef drífandi kraftar verða jafnstórir eða stærri en mótstöðukraftar jarðefnisins í tilteknum fleti. Í stöðugleikagreiningu þarf því að ákvarða krítískasta brotflötinn, skúfkraft

jarðefnis (eftir brotflatinum) og verkandi skúfspennu (eftir brotflatinum). Hlutfallið á milli skúfkrafts jarðefnisins og verkandi skúfspennu er kallað öryggisstuðull og er skilgreint sem (Das og Sobhan, 2014):

$$F_S = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (6.4)$$

Þar sem τ_f er skúfstyrkur jarðefnis eftir brotflati og τ_d er verkandi skúfspenna eftir brotflati.

Ef öryggisstuðullinn er skrifaður út frá jöfnu (6.2) fæst:

$$F_S = \frac{c' + \sigma' \cdot \tan \varphi'}{c'_d + \sigma' \cdot \tan \varphi'_d} \quad (6.5)$$

Þar sem c'_d og φ'_d eru samloðun og viðnámshorn verkandi skúfkrafts. Út frá þessu er hægt að skilgreina öryggisstuðul m.t.t. samloðunar (Das og Sobhan, 2014):

$$F_{c'} = \frac{c'}{c'_d} \quad (6.6)$$

Og einnig m.t.t. viðnámsorns (Das og Sobhan, 2014):

$$F_{\varphi'} = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi'_d} \quad (6.7)$$

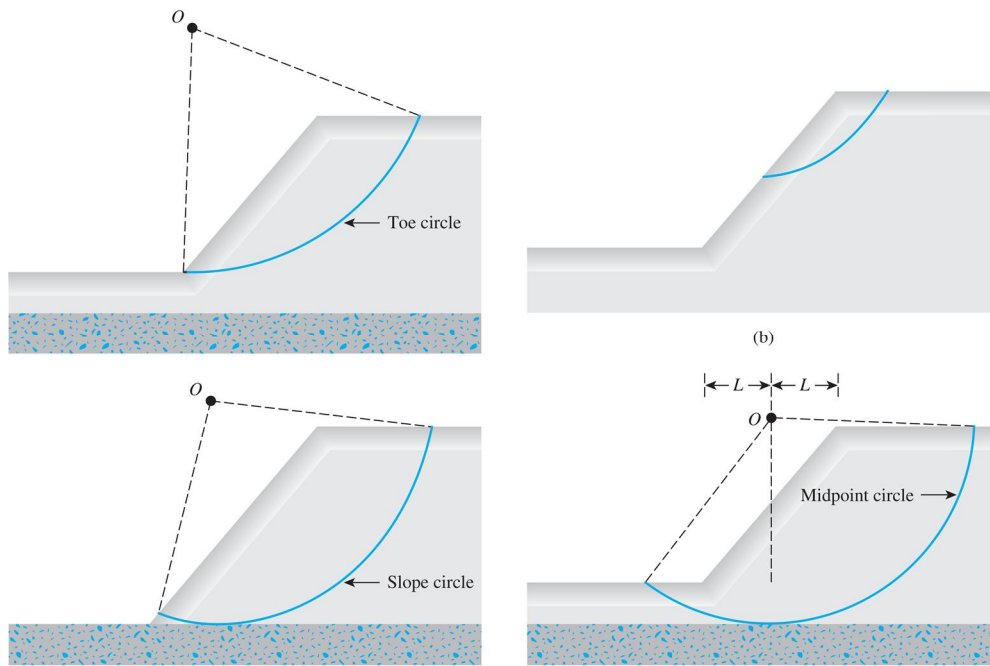
Ef síðustu þrjár ofangreindar jöfnur eru bornar saman fæst sambandið (Das og Sobhan, 2014):

$$F_S = F_{c'} = F_{\varphi'} \quad (6.8)$$

Sem segir að öryggisstuðull m.t.t. skúfstyrks er sá sami og öryggisstuðull m.t.t. viðnámsorns og samloðunar. Ef öryggisstuðull er jafnt og 1 er brot í jarðvegi yfirvofandi. Almennt séð þarf öryggisstuðull að vera minnst 1,25 eða jafnvel 1,5 svo hönnun fláa sé ásættanleg (Das og Sobhan, 2014).

6.3.1 Stöðugleikagreining

Fyrir fláa sem eru endanlegir (e. finite slopes) verður brotflöturinn oftast nær hringlaga. Til eru nokkur tilfelli brots en það fyrsta er þegar brotið verður í eða við tá fyllingarinnar, annað þegar brotið verður ofarlega í fyllingunni (grunnt brot) og það þriðja þegar brotflöturinn nær niður fyrir tána, allt að undirliggjandi stífara lagi. Sjá má brotmyndirnar á mynd 6.2.



Mynd 6.2: Mismunandi brotmyndir vegna skriðs fyllingar (Das og Sobhan, 2014).

Í þeim tilfellum þar sem verið er að skoða áhrif stöðugleika fyllingar er kítískara að skoða skammtímaáhrifin, þ.e. óframræstar aðstæður vegna þess að þegar um er að ræða manngerða fláa er öryggisstuðullinn lægstur fyrst eftir gerð fláans (Sigurður Erlingsson, 2011).

Þær aðferðir sem notaðar eru í stöðugleikagreiningu skiptast í tvennt; massaaðferð og sneiðaaðferð. Massaaðferðin felst í því að taka jarðvegin ofan brotflatarins sem eina heild en þá þarf að gera ráð fyrir því að allt jarðefnið sé einsleitt. Í sneiðaaðferðinni er jarðveginum ofan brotflatarins skipt upp í nokkrar lóðréttar sneiðar. Stöðugleiki hvernar sneiðar fyrir sig er síðan athugaður. Með þessu er hægt að taka með holrýmivatsþrýsting og misleitni (e. nonhomogeneity) jarðvegsins auk breytileika í normalspennu eftir brotflatinum (Das og Sobhan, 2014). Þá eru til margar gerðir af forritum sem reikna út stöðugleika með tölulegum aðferðum.

Heilt yfir hefur verið lýst í síðustu tveimur köflum þeirri aðferðafræði og þeim breytum er snerta sigreikninga samkvæmt aðferð Janbu's og skúfstyrk og stöðugleika jarðvegs. Hvernig töluleg gildi, fyrir þær breytur sem notaðar eru í sigreikningum, eru fengin verður fjallað um í næsta kafla.

7 Jarðvegsrannsóknir

Við hönnun vegar, hvort sem hann liggur um mýrlendi eður ei er nauðsynlegt að ráðast í jarðvegsrannsóknir til þess að afla upplýsinga um gerð og eiginleika jarðvegsins undir vegstæðinu. Með því að komast yfir efniseiginleika jarðvegsins er hægt að meta þær takmarkanir og möguleika sem umhverfisaðstæður geta skapað og þannig hagað hönnun eftir aðstæðum. Vel unnar og ítarlegar jarðvegsrannsóknir eru forsenda þess að ná fram öruggum, hagkvæmum og umhverfisvænum lausnum (Haraldur Sigursteinsson, Jón Skúlason og Sverrir Örvar Sverrisson, 2015). Hvernig komist er yfir slíka efniseiginleika felst í hinum ýmsu jarðvegsrannsóknnum sem verða kynntar hér í framhaldinu.

Almennt séð má skipta rannsóknunum í tvo hluta; feltpróf og rannsóknarstofupróf. Feltpróf eru framkvæmd úti í mörk en rannsóknarstofuprófin, eins og nafnið gefur til kynna, inni á rannsóknarstofu. Áður en farið er í slíkar rannsóknir þarf að liggja fyrir jarðfræðileg úttekt af svæðinu þar sem gert er grein fyrir jarðmyndunum og jarðvegi á vegsvæðinu, unnið upp úr gögnum og skýrslum sem til eru. Slíka jarðfræðiúttekt er hægt að nota sem grunn fyrir þær jarðfræðirannsóknir sem þarf að fara í (Haraldur Sigursteinsson, Jón Skúlason og Sverrir Örvar Sverrisson, 2015).

7.1 Utanhúss

Þegar komið er út í felti þarf að komast að ýmsum eiginleikum jarðvegsins og verður hér lögð áhersla á þær rannsóknir sem framkvæmdar eru þegar veglína liggur um mýrarjarðveg. Niðurstöður úr slíkum rannsóknnum er hægt að styðjast við þegar framkvæma á sigreikninga seinna meir.

7.1.1 Veglínuganga

Veglínuganga felst í því að veglína er gengin þar sem hægt er að meta yfirborðsaðstæður eins og skurði, farvegi, mógrafir, vatnasvæði og hvernig hægt sé að taka á slíkum atriðum (Haraldur Sigursteinsson, Jón Skúlason og Sverrir Örvar Sverrisson, 2015). Skurðir í væntanlegri veglínu í mýrarjarðvegi eru til að mynda erfiðir viðureignar þar sem hætt er við mismunasigi þegar fyllt er upp í þá.

7.1.2 Veglínuborun

Þar sem vegur liggur um mýrlendi þarf að afla upplýsinga um þykkt og gerð stakra jarðlaga í undirstöðu vegarins og er það gert með borun á um 20 m bili. Oftast er notast við snúnings- og þrýstibor, sjá mynd 7.1. Er þá borstöngum þrýst niður með stöðugum hraða og snúið á sama tíma. Þrýstingurinn sem þarf til þess að þrýsta stöngunum niður er mældur og hann teiknaður upp sem fall af dýpi. Vel er hægt að greina á milli mismunandi malarefna og mótstöðulítilla fínkorna efna. Aðferðin hentar vel í mýri þar sem mór er mótstöðulítill (Haraldur Sigursteinsson, Jón Skúlason og Sverrir Örvar Sverrisson, 2015).



Mynd 7.1: Borvagn sömu gerðar og Vegagerðin notar í jarðvegsrannsóknir. Hann getur meðal annars framkvæmt snúnings- og þrýstiborun (Geonor, e.d.).

7.1.3 Sýnataka

Taka þarf sýni, annað hvort með sýnataka á bor eða með því að grafa gryfjur. Ef gerðar eru gryfjur þarf sömuleiðis að skrá niður jarðvegssnið. Sýni í gryfjum eru tekin bæði lárétt og lóðrétt (Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson, 1972).

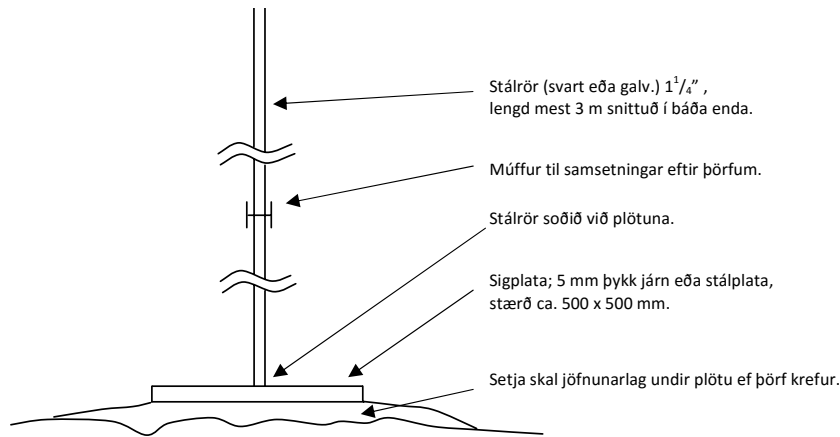
7.1.4 Grunnvatnsstaða

Ákvarða þarf stöðu grunnvatns með reglulegu millibili, helst sama millibili og borun veglínunnar fer fram á. Hægt er að mæla grunnvatnsstöðu með því að setja niður í jarðveg plaströr sem eru boruð með reglulegu millibili þannig að grunnvatnið geti flætt inn í þau. Hæð grunnvatnsins í rörunum er síðan ákvörðuð með þar til gerðum mæli (Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson, 1972).

7.1.5 Mæling á sigi

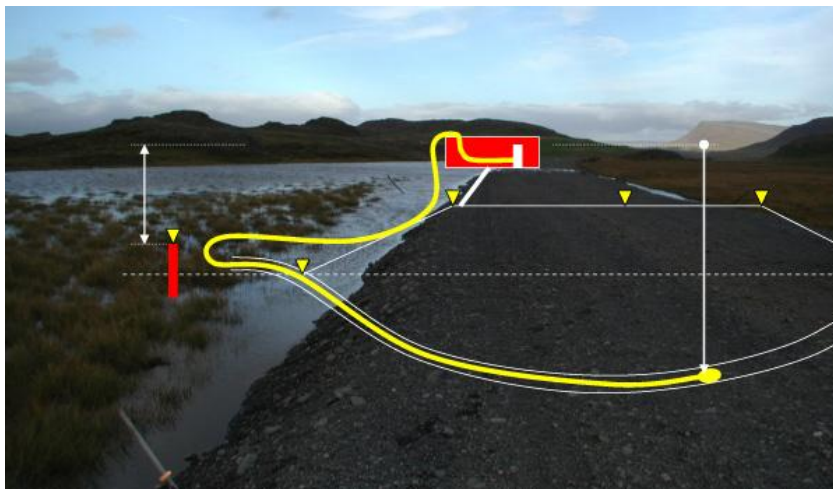
Þegar vegur er lagður yfir mýri þar sem möguleiki er á sigi er nauðsynlegt að mæla sig á svæðinu. Mæling á sigi vegfyllingar má nota til þess að sannreyna sigspá, ákvarða endanlegar yfirhæðir og magn til uppgjörs (Vegagerðin, 2010a).

Sig er mælt bæði með sigslöngum og sigplötum. Ef notast er við sigslöngu þá er lögð plastslanga, 63 mm í þvermál, þvert á veglínu í tiltekinni mælistöð. Er hún látin ná 2 m út fyrir fláafót (ysta hluta veghlots vegar) og fest niður með baulum. Áður en fyllt er að slöngunni er landið í kringum hana hæðarmælt. Þegar sigplötur eru lagðar niður skulu þær lagðar niður í þá öxl vegar sem ekki er yfir núverandi vegi eða í miðju vegar. Plöturnar eru 0,5 x 0,5 m að flatarmáli og 5 mm að þykkt. Síðan er soðið rör á miðja plötuna sem er í framhaldinu mælt á. Afstöðumynd af sigplötu má sjá á mynd 7.2. Platan er hæðarmæld áður en fyllingarvinna hefst á sigsvæðinu (Vegagerðin, 2010a).



Mynd 7.2: Dæmigerð uppsetning sigplötu í öxl eða miðju veglínu nýs vegar.

Sigmælingar eru oftast nær viðhafðar á fyrsta, þriðja og sjöunda degi eftir að nýtt álagsþrep er lagt á sigsvæðið og einnig áður en nýtt álagsþrep er lagt á. Sigmælingu á sigplötu er auðvelt að framkvæma, mæld er hæð á rörinu en þegar sigmæling í sigslöngu er framkvæmd þarf að notast við sigmælitæki sem samanstendur af þrýstiskynjara. Skynjarinn er þræddur í sigslönguna og síðan er mældur þrýstingur á skynjarann (Vegagerðin, 2010a). Afstöðumynd af slíkri mælingu má sjá á mynd 7.3.



Mynd 7.3: Afstöðumynd af mælingu í sigslöngu með notkun þrýstiskynjara (ROADDEX Network, e.d.).

7.2 Prófanir í rannsóknarstofu

Við rannsóknarvinnu á mýrarjarðvegi hefur mest áhersla verið lögð á að ákvarða ummyndunarstig, rúmþyngd, rakagildi, glæðitap og samþjöppunar- og lektareiginleika með álagstilraun (Jón Skúlason, 1978).

7.2.1 Ummyndunarstig

Ummyndunarstig er ákvarðað með aðferð sem kennd er við Svíann Lennart von Post. Þá er sýni kreist í lófa og athugað hversu mikið vatn og/eða efni pressast út á milli fingranna. Þannig má athuga hversu langt ummyndunarferlið er gengið. Síðan útbjó von Post tíu flokka sem hægt væri að flokka sýnið eftir. Þeir eru táknaðir H1-H10 þar sem tölustafurinn stendur fyrir prósentuhlutfall ummyndunar, þannig stendur 1 fyrir 10% ummyndun meðan 10 stendur fyrir 100% ummyndun (von Post, 1921). Mýrin er nær ekkert rotin við H1 og gefur frá sér litlaust vatn þegar hún er kreist í hendi. Við H10 er mýrin hins vegar nær algjörlega ummynduð og kemur öll mýrarleðjan út á milli fingra ef kreist er en vatnið skilst ekki frá henni. Ummyndunarstig íslenskrar mýrar er oftast ekki hærra en H3 til H5 (Grétar Guðbergsson og Þorleifur Einarsson, 1998). Oftast er þó notuð einfölduð tafla sem hefur þrjá ummyndunar-flokka, sjá töflu 7.1:

Tafla 7.1: Einfölduð tafla fyrir flokkunarkerfi von Post (Karlsson og Hansbo, 1989).

Merking	Flokkur (skv. von Post)	Lýsing
Trefjaríkur mór	H1-H4	Lítill ummyndun. Trefjarík uppbygging. Auðþekkjanleg plöntuuppbygging.
Meðalummyndaður mór	H5-H7	Meðalummyndun. Greinileg plöntuuppbygging.
Ummyndaður mór	H8-H10	Mikil ummyndun, engin greinileg plöntuuppbygging. Linur þéttleiki.

Með því að vita hversu ummynduð mýrin er má fá ágætis hugmynd um það hvernig hún hegðar sér undir álagi. Trefjarík mýri er þannig sterkari heldur en ummynduð mýri, þ.e. hefur hærri skúfstyrk og er fljótari að losa sig við vatn undir samþjöppun (með hærri lekt). Ef vegur er látinn taka upp burð þar sem fyllingar eru lagðar út í þrepum gengur ferlið hraðar fyrir sig með trefjaríkri mýri heldur en með ummyndaðri mýri (Munro, 2004).

7.2.2 Rúmþyngd

Rúmþyngd er hægt að ákvarða á tvo vegu; það er að segja *raka rúmþyngd*, eins og efnið kemur fyrir í náttúrunni (e. in situ) og *þurra rúmþyngd*. Raka rúmþyngd má ákvarða með:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (7.1)$$

Þar sem W er heildarþyngd sýnis, $W = W_s + W_w$, W_s er þyngd jarðefnis í sýninu og W_w er þyngd vatns í sýninu. V er heildarrúmmál sýnisins. Rúmþyngdin er mæld í kN/m^3 .

Þurra rúmþyngd má á hinn bóginn ákvarða með:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (7.2)$$

Þyngd jarðefnis í sýninu, W_s , er fengin með því að þurrka efnið við 110 °C í einn sólarhring (Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson, 1972).

Eins og oft er staðreyndin fyrir mýrarjarðveg, þá er hann vatnsmettaður og verður þá rök rúmþyngd efnisins jöfn mettaðri rúmþyngd efnisins, svo að $\gamma = \gamma_{sat}$.

7.2.3 Rakainnihald

Rakainnihald er hægt að ákvarða með (Das, 2011):

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (7.3)$$

Eins og áður er þyngd jarðefnisins í sýninu, W_s , fengin með því að þurrka sýnið við 110 °C í einn sólarhring. Vatnsmagnið, W_w , er fengið með mismuninum á þyngd raks jarðefnis og þurrs jarðefnis.

7.2.4 Glæðitap

Glæðitap (e. loss on ignition) er ákvarðað sem rýrnun efnis miðað við þurra þyngd þess eftir hitun í um 1000 °C (Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson, 1972). Þegar hitinn er kominn í um 550 °C er allt lífrænt efni horfið og við 1000 °C er allt kolefni horfið. Þannig er hægt að nota glæðitapið sem mælikvarða á það hversu mikið lífrænt efni og kolefni er í sýninu sem prófað var (Heiri, Lotter og Lemcke, 2001). Þurra þyngdin er ákvörðuð eins og áður var nefnt.

7.2.5 Ödometer

Þegar jarðvegssýni eru prófuð í ödometer er verið að mæla samþjöppunar- og lektareiginleika sýnanna. Með prófunum á slíkum sýnum er hægt að fá hugmynd um efniseiginleika jarðvegsins í heild sinni.

Aðferðafræðin við einvíða þrýstingsprófið, ödometer, var fyrst lögð fram af Terzaghi. Það gengur þannig fyrir sig að fyrst er jarðefni sett í sívalningslaga hólk sem hindrar hliðarfærslur. Síðan er sýnið beitt lóðréttum áslægum þrýstingi með möguleika á að síast, bæði að ofan og neðan (European Committee For Standardization, 2007). Er það yfirleitt gert með gegndreypum steinum sem staðsettir eru fyrir ofan og neðan sýnið. Sýnið er í vatnsbaði meðan það er álagsprófað (Das og Sobhan, 2014).

Í hefðbundnu prófi er þvermál sýnisins 50 mm og hæðin 25 mm. Hvert álagsþrep er keyrt í tiltekinn tíma, oftast einn sólarhring. Er færsla sýnisins mæld fyrir eitt tiltekið álagsþrep á fyrirframákveðnum tímum. Hér á Íslandi hefur færslan verið mæld eftir 1, 2, 4, 8, 15 og 20 mínútur og síðan eftir 1, 3, 7 og 24 klukkustundir (Oddur Þórðarson, 1996). Síðan er lagt á nýtt álag sem er yfirleitt tvöfalt fyrra álagið (Das og Sobhan, 2014) og færsla mæld á sömu tímamörkum og áður.

Á Íslandi byrjuðu menn að prófa sig með að taka óhreyfð sýni úti í felti í belgi af niðursuðudósúsum sem var á sínum tíma séríslenskt fyrirbrigði. Fyrst var þá útbúinn gryfja, síðan farið ofan í gryfjuna, útbúinn stallur inn í jarðveginn og óhreyfð sýni tekin þar, bæði lárétt og lóðrétt (Vegagerðin, 2010b).

Vegna þess að ekki er hægt að framkvæma staðlað ödometerpróf án þess að hreyfa sýnin, var farið í það að prófa þau óhreyfð. Sýnatökuhylkið, eða niðursuðudósinn er 76 cm² að

flatarmáli og um 11 cm á hæð (Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson, 1972). Sýnin voru síðan sett í álagspróf í niðursuðudósinni, sem gerði það að verkum að hliðarformbreytingar voru hindraðar. Þarna var í raun og veru kominn vísir að umbreyttu ödometerprófi sem enn þann dag í dag er við lýði og má sjá á mynd 7.4.



Mynd 7.4: Jarðvegssýni prófað í sérsníðuðum ödometer (Haraldur Sigursteinsson, 2010).

Til samanburðar hafa verið gerðar rannsóknir á sýnum, bæði í stórum og litlum hefðbundnum ödometer og var það reynsla manna að stærri ödometerinn gæfi betri niðurstöður (Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson, 1972). Enda má telja að svo sé vegna munarins á hreyfðu og óhreyfðu sýni. Eingöngu sú athöfn að skera sýni úr upprunalegu sýnatökuhylki og setja í hefðbundinn ödometer er líkleg til þess að valda skekkju í rannsóknarniðurstöðum.

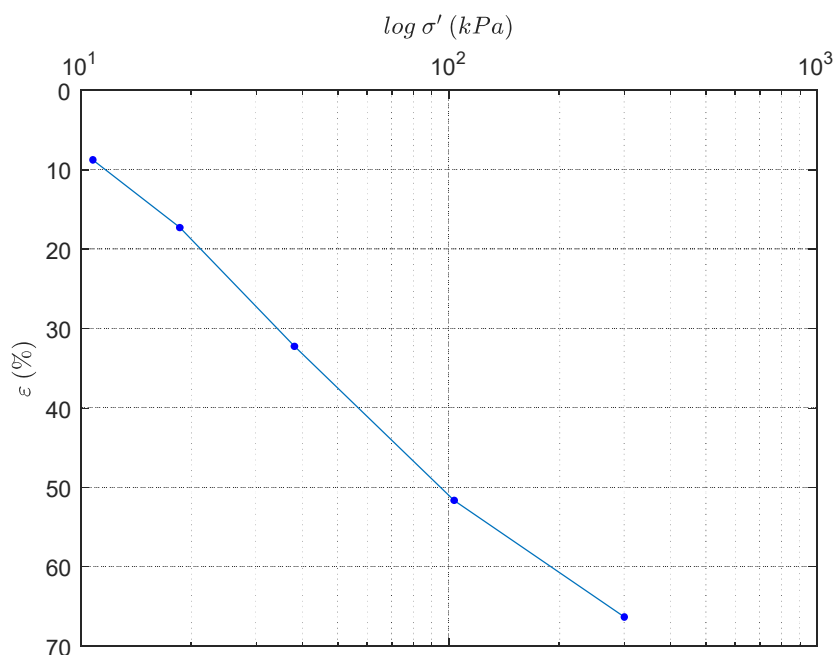
Þegar búið er að keyra álagsprófið, sem getur tekið allt upp í heila viku, en það veltur á fjölda álagsþrepa, er hægt að fara vinna með niðurstöður álagsprófsins. Hér á eftir verða notuð gögn úr álagsprófi sem var framkvæmt þann 22. apríl 1996. Sýnið var tekið úr veglínu Vesturlandsvegjar. Keyrð voru á sýnið fimm álagsþrep, fyrsta 10,8 kPa, annað 18,6 kPa, þriðja 38,1 kPa, fjórða 103,5 kPa og fimmta 300,0 kPa, þar sem hvert og eitt þeirra stóð í einn sólarhring. Tölulegar upplýsingar um sýnið má finna í töflu 7.2 (Oddur Þórðarson, 1996). Keyrsluniðurstöður fyrir sýnið má sjá í viðauka B.

Tafla 7.2: Tölulegar upplýsingar um sýnið.

Skýring	Breyta	Gildi
Hæð	h (cm)	11,9
Þverskurðarflatarmál	A (cm ²)	42,1
Rúmmál	V (cm ³)	501,0
Rakagildi	w (%)	752,4
Rúmþyngd	γ (kN/m ³)	9,65
Þurr rúmþyngd	γ_d (kN/m ³)	1,13
Dýpi	d (m)	0,85

Þar sem staða grunnvatnsyfirborðs er ókunn er ekki hægt að reikna virkar spennur en telja má líklegt að grunnvatnið sé ansi nálægt yfirborði sökum hás rakagildis og því er hægt að áætla að virk spenna liggi nálægt núlli, $\sigma' \approx 0$ kPa.

Eitt af markmiðunum með gerð álagsprófsins er að athuga samþjöppunareiginleika jarðvegsins og því er ekki úr vegi að skoða formbreytingu sýnisins sem fall af virkri spennu sem á það verkaði, sjá mynd 7.5.



Mynd 7.5: Formbreyting sýnis sem fall af virkri spennu.

Eins og sést á mynd 7.5 er sýnið búið að þjappast saman um rétt tæplega 70% af upphaflegri hæð sinni og getur það gefið hugmynd um það hversu ótrúlega samþjappanlegur mýrarjarðvegur er.

Tímalengd skammtímasigs

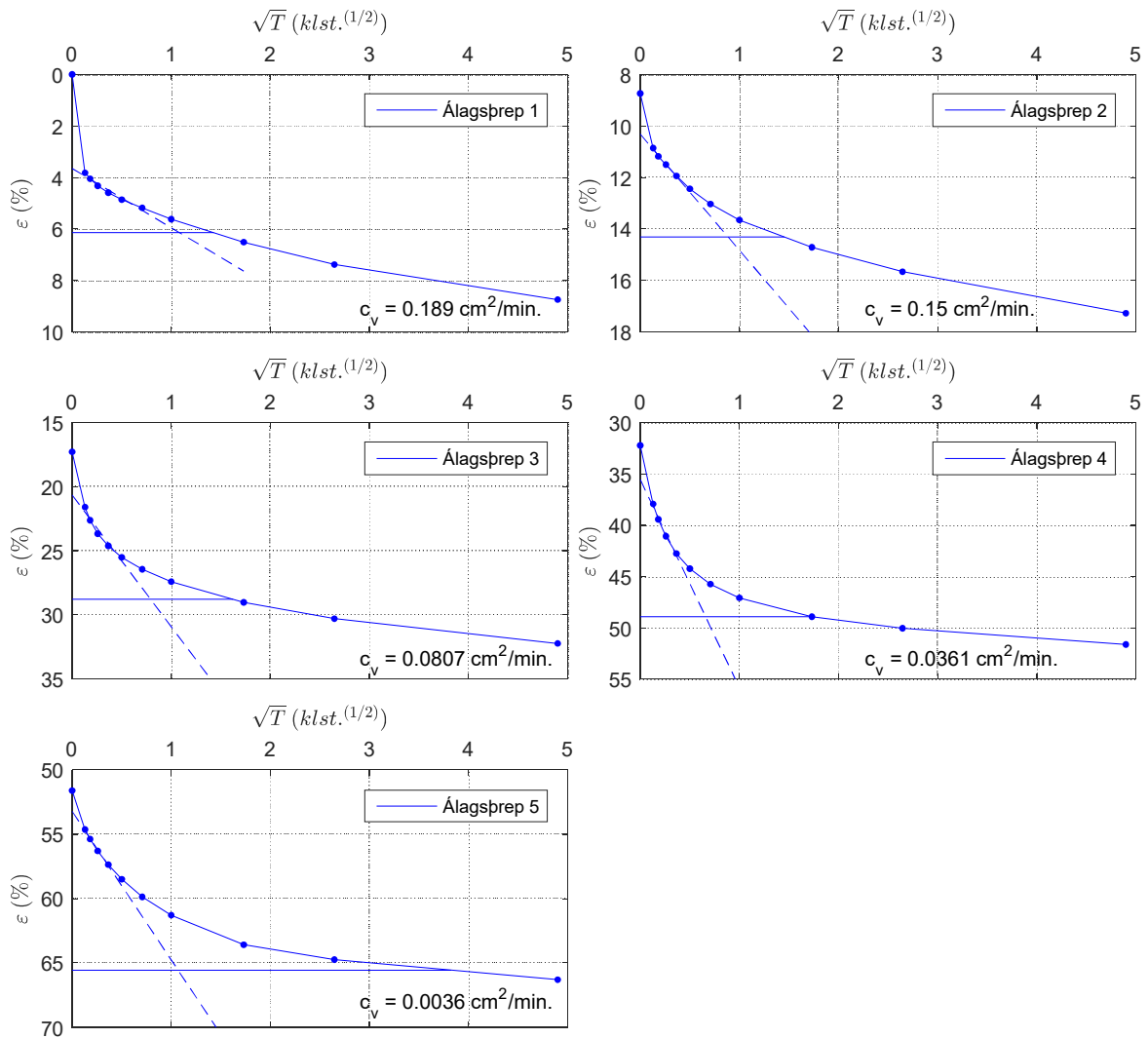
Til þess að geta ákvarðað tímalengd skammtímasigs þarf að vita þéttingartíma og -stuðul. Fyrsta skrefið í því ferli er að teikna upp formbreytingu sýnanna sem fall af kvaðratrótinni af tímanum fyrir öll álagsþrepin. Til eru nokkrar aðferðir sem hægt er að nota til ákvörðunar

á þéttingarstuðlinum. Þar á meðal logra-tíma aðferð (e. Logarithm-of-Time Method), kvaðratrótar-tíma aðferð (e. Square-root-of-Time Method) sem og snemmstigs logra-tíma aðferð (Early Stage log-t Method). Hér verður þéttingarstuðullinn reiknaður út frá kvaðratrótar-tíma aðferðinni. Aðferðin var fyrst kynnt til sögunnar af Donald W. Taylor og nefndi hann aðferðina „square root fitting method“ (Taylor, 1948).

Fyrst er tekin besta lína í gegnum fyrri hluta samþjöppunarferilsins að undanskildum núllpunktinum. Þar sem línan byrjar er raunveruleg núlllína. Frávikið á milli nýju núlllínunnar og þeirrar mældu er frumsig og var lítillaga fjallað um í kafla 5.1. Önnur lína er síðan dregin þar sem búið er að stækka lárétt hnit bestu línunnar um 15%. Þar sem sú lína sker upprunalega ferilinn er hægt að lesa út tíma fyrir 90% þéttingu. Út frá þeirri vitneskju leiddi Taylor út jöfnu fyrir þéttingarstuðlinum en Janbu lét þetta ekki nægja og hélt áfram þaðan sem Taylor lét staðar numið. Þar sem vitað er hvar 90% þétting á sér stað er hægt að ákvarða hvar 100% þétting á sér stað sömuleiðis. Þar sem mældi ferillinn sker línuna fyrir 100% þéttingu er hægt að lesa út tímann sem það tekur að ná fram 100% þéttingu, það er t_p . Þá er hægt að reikna þéttingarstuðulinn með þessari jöfnu hér (Janbu, 1970):

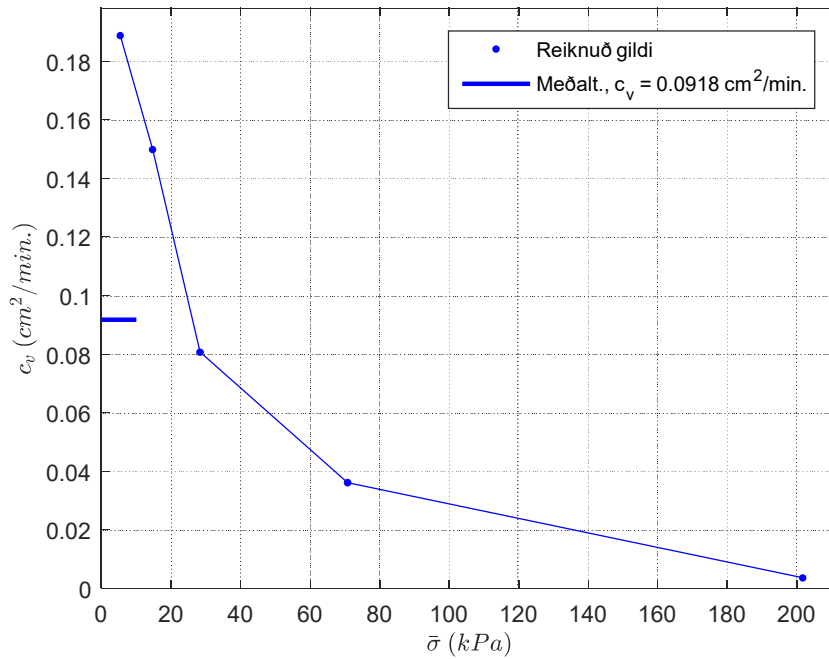
$$c_v = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{H_{dr}^2}{t_p} \quad (7.4)$$

Þar sem H_{dr} er lengd afrennslisleiðar sýnisins og t_p er þéttingartíminn. Dæmigerðar niðurstöður fyrir þetta ferli má sjá á mynd 7.6.



Mynd 7.6: Formbreyting sem fall af tíma fyrir álagsþrepin fimm. Á myndinni er besta lína í gegnum fyrrihluta punktastafsins sýnd og lárétt lína sem stendur fyrir 100% þéttingu. Þá er reiknaður þéttingarstuðull sýndur.

Í framhaldinu er hægt að taka upp þessar niðurstöður og setja fram þéttingarstuðul sem fall af meðalspennu, sjá mynd 7.7.

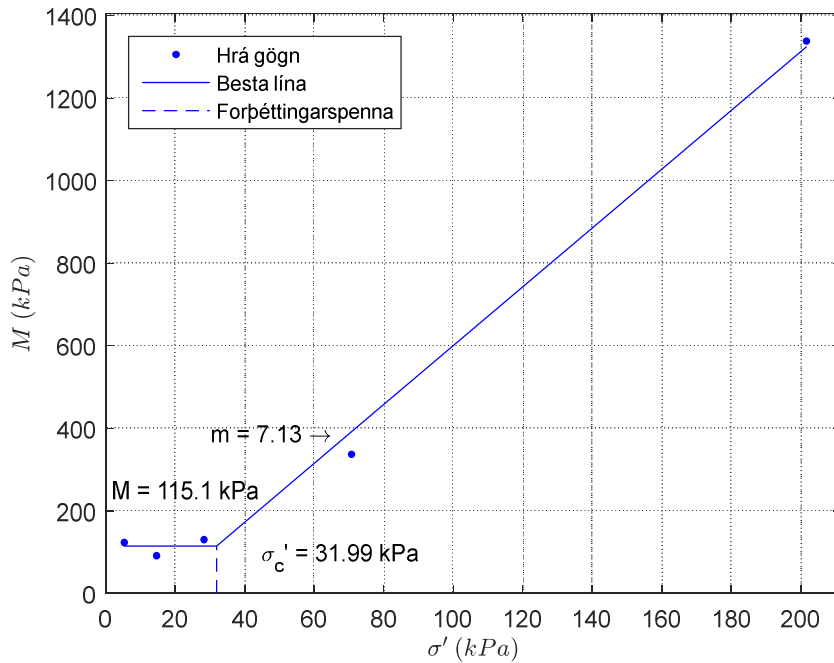


Mynd 7.7: Þéttingarstuðull sem fall af meðalspennu auk meðaltals þéttingarstuðuls.

Eins og sjá má á mynd 7.7 lækkar þéttingarstuðullinn með aukinni spennu. Endanlegt gildi til notkunar í sigreikninga fer að nokkru leyti eftir álaginu sem mun koma til með að verka á jarðveginn.

Spennumótstaða

Eins og kom fram í kafla 5.3 er hægt að reikna spennumótstöðuna og teikna upp sem fall af spennunni. Hér er miðað við svokallaða meðalspennu en þá er tekið meðaltal upphafs- og lokaspennunnar sem verkaði á sýnið í hverju álagsþrepi.



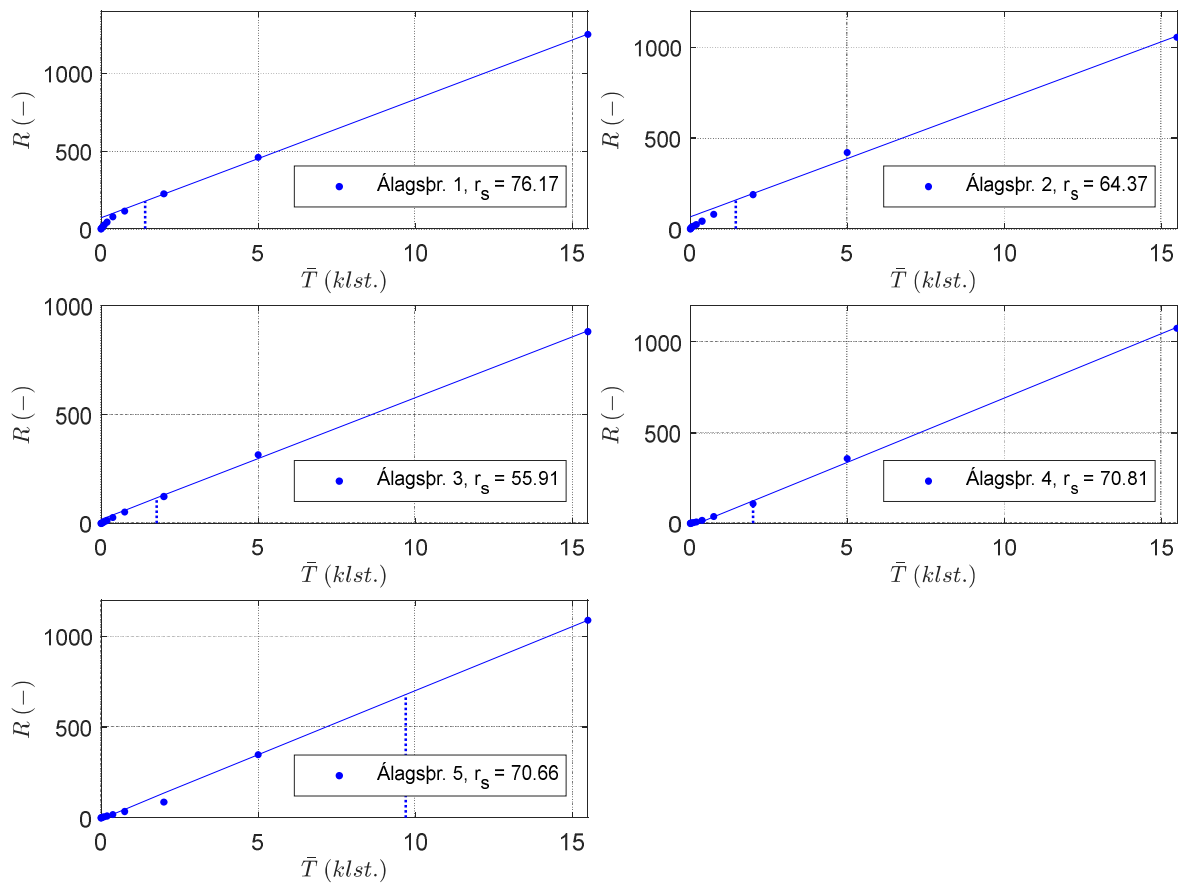
Mynd 7.8: Spennumótstaða sem fall af virkri meðalspennu. Búið er að reikna út spennumótstöðu efnisins, móðultölu og forþéttingarspennu.

Spennumótstaðan er nálgueð sem lárétt lína á forþéttingarsvæðinu en á jómfrúarsvæðinu er móðultalan nálgueð sem bein lína. Eins og sést á mynd 7.8 er búið að ákvarða forþéttingarspennuna og sést þá, miðað við að virk spenna liggja mjög nálægt núlli, að yfirþéttingarhlutfallið er mjög hátt, sem gefur til kynna að mikið hafi sorfið ofan af jarðveginum áður fyrr.

Útreiknaðar stærðir er síðan hægt að nota í framhaldinu til þess að ákvarða hversu mikið skammtímasig jarðvegsins verður.

Tímamótstaða

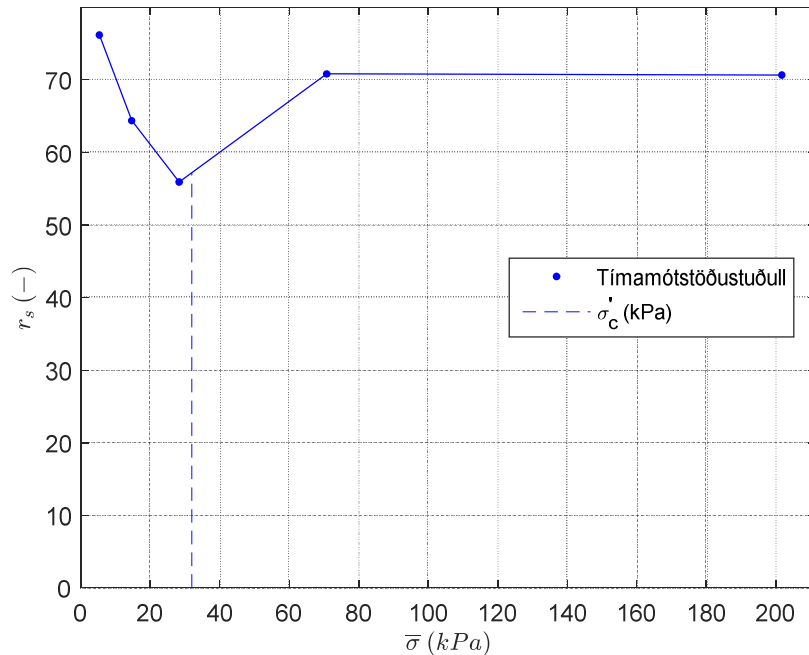
Tímamótstöðuna á eftir að ákvarða en hún er reiknuð á sama hátt og var lýst í kafla 5.5. Eins og gert var þegar spennumótstaðan var reiknuð, að notast við meðalspennu, þá er notast við meðaltíma fyrir tímamótstöðuna. Meðaltímann má reikna á þennan hátt; $\bar{t} = (t_i + t_{i-1})/2$. Tímamótstaðan er reiknuð fyrir öll álagsþrepin og teiknuð upp sem fall af meðaltímanum. Til þess að finna tímamótstöðustöðulinn er tekin besta lína tímamótstöðunnar frá aðal-tímanum og fundin hallatala hvernar og einnar línu fyrir sig. Niðurstöðuna má sjá á mynd 7.9.



Mynd 7.9: Tímamótstaða sem fall af meðaltímanum. Einnig er búið að reikna tímamótstöðustöðul fyrir hvert og eitt álagsþrep.

Á mynd 7.9 er búið að reikna tímamótstöðustöðul fyrir hvert og eitt álagsþrep. Tekin er hallatala bestu línu þess hluta ferilsins sem liggur fyrir aftan aðaltímann, t_p . Aðaltíminn er merktur inn á myndina fyrir hvert og eitt álagsþrep.

Þegar búið er að ákvarða tímamótstöðustöðulinn er hægt að teikna upp stuðulinn sem fall af meðalspennunni, sjá mynd 7.10.



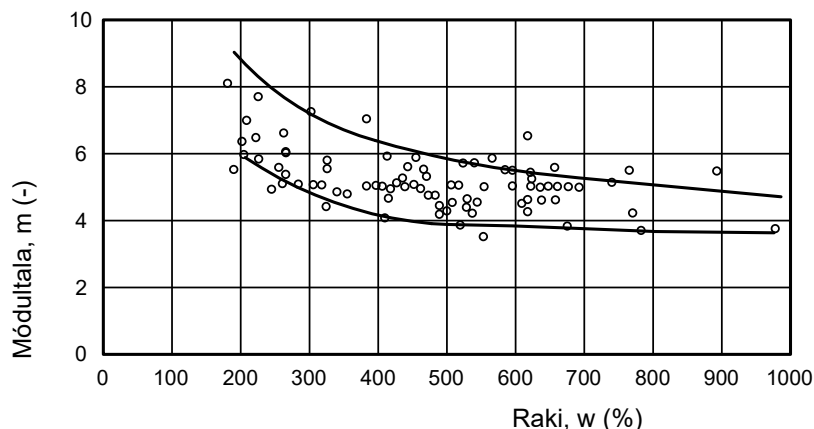
Mynd 7.10: Tímamótstöðustuðull sem fall af meðalþéttu auk þess sem reiknuð forþéttingarspenna er sýnd.

Eins og sjá má á mynd 7.10 eru niðurstöðurnar þar í ágætis samræmi við það sem Janbu lagði fram um að tímamótstöðustuðullinn væri frekar hár á forþéttingarsvæði en á jómfrúarsvæði væri hann lægri og myndi síðan vaxa hægt. Var þetta sýnt myndrænt á mynd 5.10. Þó má leiða að því líkur í þessu tilfalli að tímamótstöðustuðull fyrir þriðja álagsþrepið sé ef til vill of hár.

7.3 Reynslulíkingar

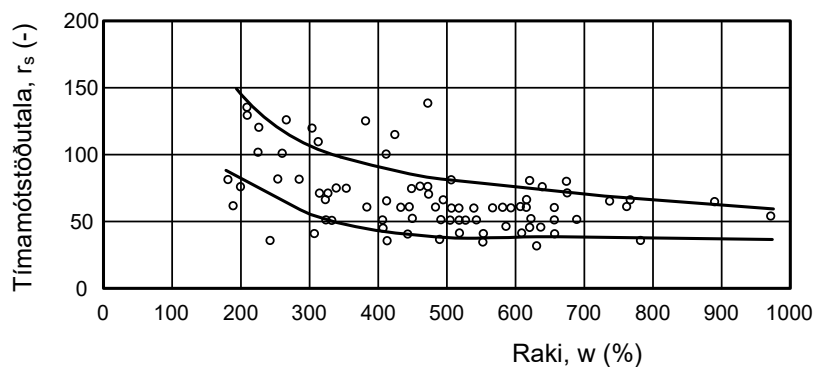
Upp úr 1970 var tekinn nokkur fjöldi af jarðvegssýnum hér á landi í tengslum við fyrirhugaðar vegaframkvæmdir á vegum sem lágu yfir mýrarkenndan jarðveg. Þar sem fjármagn getur oft og tíðum verið af skorum skammti var farið í það að safna niðurstöðunum saman og setja upp sem fall af almennum eiginleikum efnanna (Jón Skúlason, 1992).

Áætlað hefur verið við ákvörðun á rakagildi efnis gefi góða möguleika á ákvörðun módultölu og tímamótstöðustuðuls. Þannig hefur verið hægt að útbúa myndir er sýna annars vegar módultöluna m og hins vegar tímamótstöðustuðulinn r_s sem fall af efnisraka sýnis innan ákveðinna markalína (Jón Skúlason, 1992), sjá mynd 7.11 og mynd 7.12.



Mynd 7.11: Tengsl móðultölu og efnisraka sýnd fyrir mýrarjarðveg, byggt á Jón Skúlason (1992).

Eins og sjá má á mynd 7.11 liggur móðultalan á bilinu 4-7 fyrir efnisraka upp á 200-1000%.



Mynd 7.12: Tengsl tímamótstöðustöðuls og efnisraka sýnd fyrir mýrarjarðveg, byggt á Jón Skúlason (1992).

Eins og sjá má á mynd 7.12 liggur tímamótstöðustöðullinn á bilinu 40-140 fyrir efnisraka upp á 200-1000%. Þar sem sighraði í mýri ákvarðast af lektarleið og þéttingarstuðlinum c_v hefur það fengist með mælingum á sigi ásamt niðurstöðum úr ödometerprófum að þéttingarstuðullinn er yfirleitt af stærðargráðunni 0,5-3,0 $\text{cm}^2/\text{mín}$. Þá hefur verið hægt að ákvarða spennamótstöðuna á bilinu 300-600 kPa og forþéttingarspennuna á bilinu 20-40 kPa (Jón Skúlason, 1992).

Þessar reynslulíkingar hafa leitt það af sér að fljótlegt og ódýrt er að meta gróflega stærðargráðu sigvandamála í frumathugun. Út frá hreyfðum sýnum er þannig hægt að sjá hverjir líklegir efniseiginleikar séu og þá hægt að meta hvort arðbært sé að fjárfesta í sýnatöku á óhreyfðum sýnum og nánari rannsóknum á þeim. Forþéttingarspennu er ekki hægt að ákvarða nema með tilraun á viðkomandi jarðefni og þar sem hún er eitt mikilvægasta ákvörðunaratriðið við val á hönnunarforsendum fyrir sigáætlanir er æskilegt að hún sé ákvörðuð með tilraun (Jón Skúlason, 1992), að minnsta kosti fyrir stærri framkvæmdir.

Nú er búið að fjalla að mestu um bakgrunnsbreytur sigreikninga, hvernig sig er ákvarðað og hvernig hægt er að haga veglagningu um mýrlendi. Í næsta kafla verður þessari þekkingu beitt á raunverulegar aðstæður.

8 Nýr Suðurlandsvegur

Þegar talað er um Suðurlandsveg er oftast verið að hugsa um vegkaflann sem liggur frá Reykjavík um Sandskeið, Hellisheiði, Hveragerði, í gegnum Selfoss og síðan austur um eins og þjóðvegur eitt liggur. Það má segja að hann tengi saman Suðurlandsundirlendið við höfuðborgarsvæðið. Mikil umferð er um veginn, má þar helst nefna fólk að sækja atvinnu og þjónustu, vöruflutninga, fólk á leið í frístundahús og ferðamenn sem sækja mikið á Suðurlandið. Vegna mikillar umferðar og aukinnar kröfu um umferðaröryggi hefur verið unnið að breytingum á veginum á síðustu árum.

8.1 Núverandi aðstæður

Upp úr miðjum fyrsta áratug þessarar aldar hefur verið unnið að tvöföldun Suðurlandsvegar, það er að segja kaflans á milli Reykjavíkur og Selfoss. Eins og staðan er í dag er vegurinn að mestu leyti annað hvort 2+1 vegur eða 2+2 vegur frá Reykjavík að Hveragerði. 2+1 vegur er oftast með umferðarstefnur aðskildar með vegriði en 2+2 vegur er oftast með umferðarstefnur aðskildar með miðdeili. Hins vegar er vegurinn milli Hveragerðis og Selfoss hefðbundinn einnar akbrautar vegur með tveimur akreinum þar sem umferðarstefnur eru ekki aðskildar (EFLA verkfræðistofa, 2010).

Nú er svo komið að næsta skref hjá Vegagerðinni í þessu framkvæmdaferli er breikkun vegarins milli Hveragerðis og Selfoss. Sá vegkafla er um 13,1 km langur (EFLA verkfræðistofa, 2010). Árið 2014 var ársdagsumferð á kaflanum frá Þorlákshafnarvegi við Hveragerði að Biskupstungnabraut 6.969 ökutæki/sólarhring en á kaflanum frá Biskupstungnabraut að Eyrarbakka vegi á Selfossi 8.696 ökutæki/sólarhring (Vegagerðin, 2015b). Hins vegar gera veghönnunarreglur Vegagerðarinnar ráð fyrir því að vegurinn geti borið allt að 7.000 ökutæki/sólarhring (Vegagerðin, 2011). Það má því vera ljóst að grípa þarf til aðgerða til þess að auka umferðarrýmnd vegarins. Hægt er að sjá á mynd 8.1 staðhætti á svæðinu.



Mynd 8.1: Núverandi Suðurlandsvegur milli Hveragerðis og Selfoss. Byggt á gögnum frá Landmælingum Íslands.

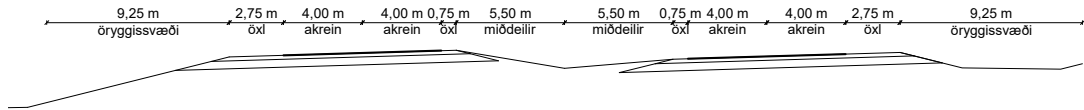
Eins og sést á mynd 8.1 er Suðurlandsvegur milli Hveragerðis og Selfoss táknaður með rauðum lit. Áætlað er að með breikkun vegarins megi ná fram auknu umferðaröryggi og aukinni afkastagetu vegarins (EFLA verkfræðistofa, 2010). Veglagningin liggur um fjögur sveitarfélög; Hveragerðisbæ, Ölfus, Árborg og Flóahrepp (austan við Ölfusá) en þó að mestu leyti um Ölfus.

8.2 Nýr vegur

Í matsskýrslu sem unnin var árið 2010 vegna Suðurlandsvegar frá Hveragerði og austur fyrir Selfoss er gert ráð fyrir að vegurinn verði tvöfaldaður með þversniði A₃₄, sjá mynd 8.2, og byggð ný brú yfir Ölfusá og vegurinn færður norður fyrir Selfoss (EFLA verkfræðistofa, 2010). Hins vegar kemur það fram í tillögu til þingsályktunar um fjögurra ára samgönguáætlun fyrir árin 2015-2018 að vegurinn frá Kambarótum að Biskupstungnabraut verði gerður að 2+1 vegi með aðskildum akbrautum með vegriði og planvegamótum. Þó verði öll undirbygging byggð sem 2+2 í upphafi þó svo að malbiks- og burðarlag verði lagt sem 2+1 vegur. Allar breiddir og rými munu gera ráð fyrir breikkun síðar í 2+2 veg (Guðmundur Valur Guðmundsson, 2016). Þrátt fyrir þær vangaveltur sem hér hafa verið lagðar fram verður, fyrir sakir verkefnisins sem hér um ræðir, haldið við upprunalega hugmynd um tvöföldun vegarins.

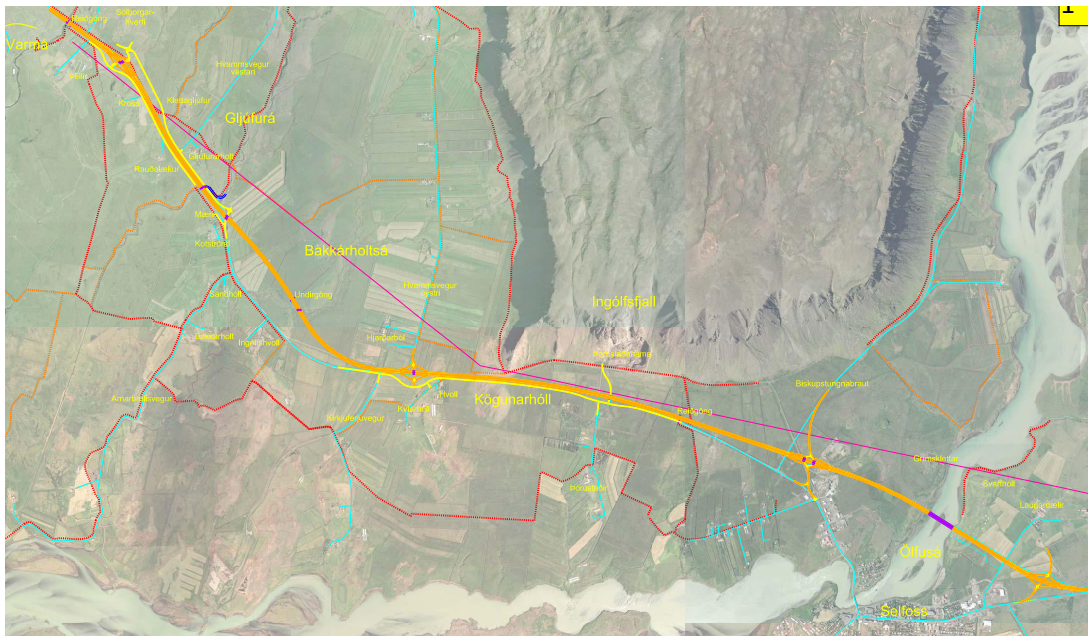
Áætlanir gera ráð fyrir að samhliða gerð nýs 2+2 vegar verði byggð fjögur mislæg gatnamót. Vegurinn mun liggja að mestu leyti ofan í núverandi veglínu allt austur að Kotströnd en þaðan og að Hvammsvegumótum mun veglínan liggja norðar þar sem vegurinn verður færður norður fyrir Selfoss. Þá verður byggð ný brú yfir Ölfusá, annað hvort við Efri

Laugardælaeyju eða við gamla ferjustæðið í ánni en tvær veglínur eru til skoðunar á þeim kafla. Þversnið nýs vegar er 34 m breitt með öryggissvæði sbr. mynd 8.2 (EFLA verkfræðistofa, 2010).



Mynd 8.2: A_{34} þversnið, tvær akreinar í hvora átt aðskildar með miðdeili (EFLA verkfræðistofa, 2010).

Áætlaða nýja veglínu fyrir þá lausn þar sem farið er yfir Ölfusá á brú yfir Efri Laugardælaeyju má sjá á mynd 8.3.



Mynd 8.3: Áætluð veglína nýs Suðurlandsvegar frá Hveragerði austur fyrir Selfoss (EFLA verkfræðistofa, 2010).

Í aðalskipulagsáætlunum sveitarfélaganna sem vegurinn liggur um hefur veglína nýs vegar verið á uppdráttum allt frá árinu 1970 (Vinnustofan Þverá, 2011). Með því að skoða veglínuna nýs vegar og nágrenni hennar á aðalskipulagsáætlunum má sjá hver landnotkunin verður í framtíðinni og þannig spá fyrir um mögulegar breytingar á landi, þar með talið breytingar á grunnvatnsstöðu en hækkun eða lækkun grunnvatnsyfirborðs getur minnkað og aukið sig og sighraða.

8.2.1 Skipulagsáætlanir

Ef það kemur í ljós við skoðun á skipulagsáætlunum að skipulögð er byggð eða athafnasvæði í grennd við veglínuna má búast við því að grunnvatnsstaða lækki á svæðinu sem eykur virka rúmþyngd efna sem liggja fyrir ofan grunnvatnsyfirborðið. Það kemur til vegna mismunar í

rúmþyngd jarðefna fyrir ofan og neðan grunnvatnsyfirborð. Jarðefni ofan grunnvatnsyfirborðs hafa rúmþyngdina γ meðan efni undir grunnvatnsyfirborði hafa virku rúmþyngdina $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ (Das, 2011). Með því að hafa mögulegar framtíðarbreytingar á grunnvatnsstöðu með í hönnun vegar um mýrlendi þar sem von er á sigi er möguleiki á að koma í veg fyrir sigi í framtíðinni sem annars hefði komið fram við breytingar á grunnvatnsstöðu.

Í aðalskipulagi Hveragerðisbæjar 2005-2017 má sjá skipulag í kringum nýjan Suðurlandsveg, sjá mynd 8.4.

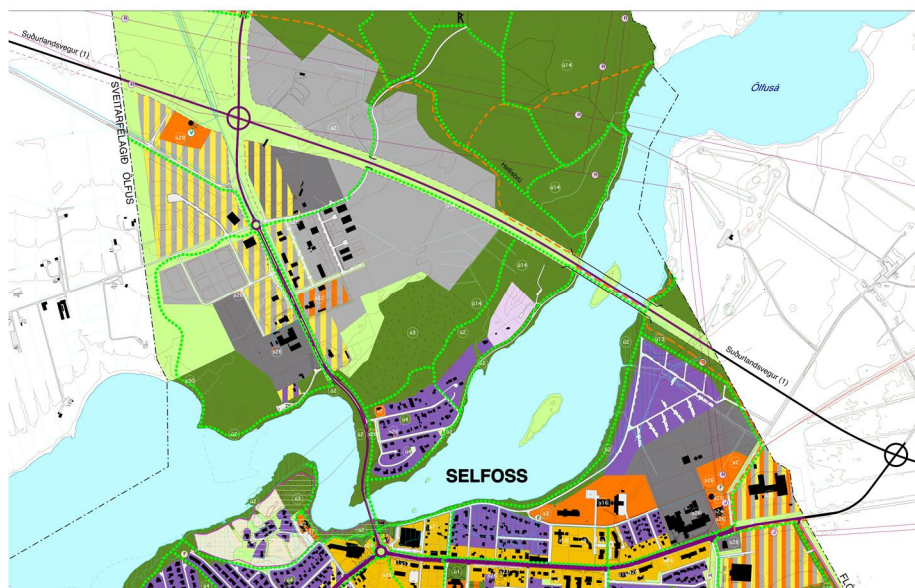


Mynd 8.4: Aðalskipulag Hveragerðisbæjar 2005-2017 í kringum nýjan Suðurlandsveg (Landform ehf, 2006).

Í aðalskipulaginu er búið að taka tillit til tvöföldunar Suðurlandsvegar og gerð mislægra gatnamóta með því að taka frá landsvæði á skipulagsuppdrættinum. Að öðru leyti er gert ráð fyrir uppbyggingu íbúðabyggðar (fjólublátt) austan við núverandi íbúabyggð meðfram Suðurlandsveginum.

Í aðalskipulagi Ölfuss 2010-2022, á skýringaruppdrætti fyrir Suðurlandsveg og aðliggjandi byggð má sjá að gert er ráð fyrir verslunarsvæði við Ingólfshvol og við sveitarfélagsmörkin í austri (Steinsholt og Landmótun, 2012). Að öðru leyti er ekki að búast við mikilli uppbyggingu í grennd við nýjan veg.

Í Aðalskipulagi Árborgar 2010-2030 er eftirfarandi skipulag í gildi í kringum nýjan Suðurlandsveg, sjá mynd 8.5.



Mynd 8.5: Aðalskipulag Árborgar 2010-2030 í kringum nýjan Sudurlandsveg sem áætlað er að liggja um Efri-Laugardælaeyju (Vinnustofan Þverá, 2010).

Á mynd 8.5 að gert er ráð fyrir töluverðu athafnasvæði við veginn frá hringtorgi við Biskupstungnabraut langleiðina að nýrri brú yfir Ölfusá. Uppbygging á þessu svæði mun lækka grunnvatnsstöðu á svæðinu ef gert er ráð fyrir að hún sé nærri yfirborði eins og er. Verður að hafa þetta í huga við hönnun vegarins.

Í tillögu að Aðalskipulagi Flóahrepps 2015-2028 er eina uppbyggingarsvæðið í grennd við veginn svæði fyrir verslun og þjónustu beggja vegna vegarins við mislæg gatnamót austan Selfoss (Steinsholt, 2016). Telja verður afar líklegt að mislægu gatnamótin sem eru skipulögð á þessu svæði verði grafin út og eru breytingar á grunnvatnsstöðu því ekki líklegar til þess að hafa í för með sér mikil áhrif á veglagninguna.

8.2.2 Jarðfræðilegar aðstæður

Varðandi almennar jarðfræðilegar aðstæður á svæðinu er berggrunnurinn að mestu hulinn þykkum jarðvegi og/eða fínkornóttum setlögum. Lekt yfirborðslaganna er lítil og undir þeim eru frekar þétt berglög sem leiðir af sér að grunnvatnsstaða á svæðinu er frekar há. Þá hafa flestar, ef ekki allar mýrar og votlendi á framkvæmdasvæði nýs vegar verið ræst fram. Hafa mælingar á grunnvatnsstöðu á völdum stöðum í vegstæðinu sýnt að grunnvatnið er um 0,5-1,8 m undir yfirborðinu með sveiflu upp á 0,4-0,6 m (EFLA verkfræðistofa, 2010). Af þessu má vera ljóst að áhrif af uppbyggingu í nágrenni vegarins mun hafa minni áhrif en búast mætti við ef grunnvatnið væri í yfirborðinu.

Vegstæði nýs vegar liggur að mestu á berggrunni sem hulinn er þykkum jarðvegi. Á kaflanum frá Vallavegamótum rétt austan Hveragerðis allt austur að Ölfusá er jarðvegurinn ofan á berggrunninum að miklu leyti mýri. Á þeim tíma sem núverandi vegur var byggður þurfti að taka tillit til þessara mýra við hönnun og framkvæmd og mun þurfa að taka tillit til þeirra við tvöföldun vegarins nú.

8.3 Gerð sigspár

Vegna þeirrar mýri sem núverandi og tilvonandi vegur liggur um er nauðsynlegt að koma fram með sigspá sem getur gefið vísbendingu um stærðargráðu sigsins, það er að segja hvert skamm- og langtímasig jarðvegsins verður.

Fyrst verða skoðuð gögn úr Þórustaðamýri frá árinu 1972 og þær niðurstöður síðan bornar saman við rakasýni sem tekin voru úr nýrri veglínu árið 2009. Í framhaldinu verða lagðar fram forsendur fyrir sigspá og síðar lögð fram sigspá fyrir nýjan Suðurlandsveg.

8.3.1 Gögn um Þórustaðamýri 1972

Við gerð Suðurlandsvegjar á árunum upp úr 1970 var farið í rannsóknir á efniseiginleikum Þórustaðamýrar í Ölfusi. Mýrin liggur allt frá Kögunarhól að Ölfusá og takmarkast í norðri af Ingólfsfjalli og í suðri af Ölfusá. Rannsóknir á svæðinu fólust í mælingu á jarðvegsdýpt eftir veglínunni, mælingu á grunnvatnsstöðu auk þess sem grafnar voru tvær gryfjur og úr þeim tekin sýni sem voru rannsökuð nánar. Gryfjurnar voru teknar 0,4 km og 1,9 km austan við Kögunarhól, nefndar gryfja 1 og gryfja 2. Almennar niðurstöður sýndu að mýrin væri allt að 7 m þykk í veglínunni með vatnsleiðandi sand- eða malarlag neðst. Þá væri mýrin sjálf lagskiptur mór með þunnum öskulögum. Efniseiginleika sýnanna úr gryfjunum má sjá í töflu 8.1 (Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson, 1972). Nánari niðurstöður má nálgast í viðauka C, hér aftast.

Tafla 8.1: Efniseiginleikar sýna úr gryfjum 1 og 2, sýni tekin á 0,9-4,4 m dýpi. Efniseiginleikarnir eru gefnir sem meðaltal eða á ákveðnu bili.

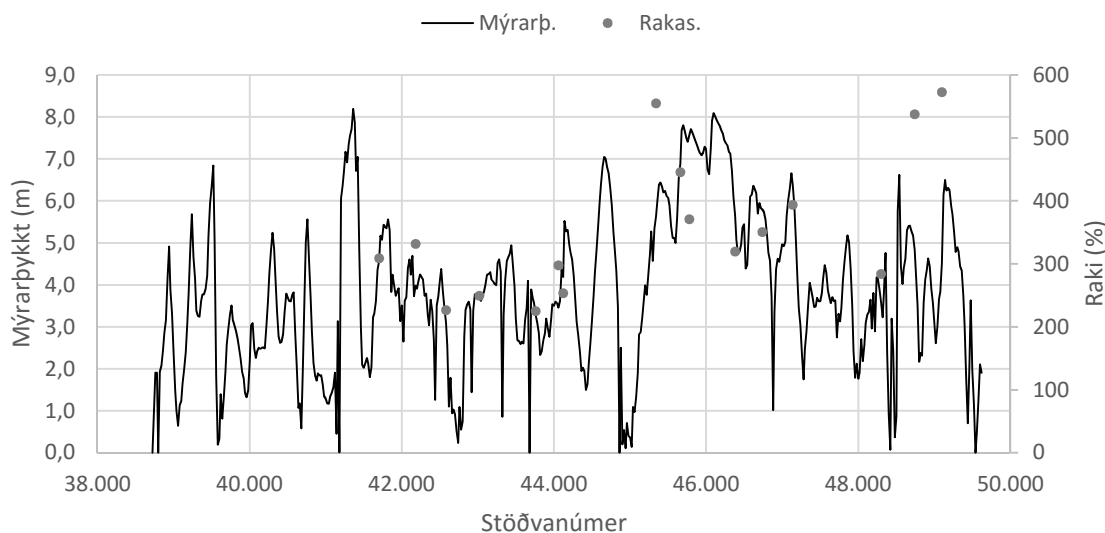
Skýring	Tákn	Gryfja 1	Gryfja 2
Raki	w (%)	480	320
Þurr rúmþyngd	γ_d (kN/m^3)	1,8	2,6
Vot rúmþyngd	γ (kN/m^3)	10,3	10,8
Glæðitap	(%)	45-80	30-65
Spennumótstaða	M (kPa)	110-290	210-320
Módultala	m	4-5	4,5-5
Þéttingarstuðull	c_v ($cm^2/mín.$)	6,0	6,0-7,0
Forþéttingarspenna	σ'_c (kPa)	15-18	25-40
Yfirþéttingarhlutfall	OCR	3-6	5-12
Tímamótstöðustuðull	r_s	65-80	75-90

Eins og sjá má af glæðitapinu er töluvert magn af steinefnum í mýrinni. Mýrin er töluvert blaut og í öllum tilfellum er hún yfirkonsoliduð. Vegna þess hve þéttingarstuðullinn er hár má búast við því að mýrin sé fljót að konsolidera sig. Hátt steinefnainnihald mýrarinnar er líklegt til þess að valda því.

8.3.2 Ný gögn

Í tengslum við áætlanir um tvöföldun Suðurlandsvegjar hóf Vegagerðin rannsókn á jarðvegsaðstæðum í nýrri veglínu. Árið 2009 voru tekin alls 18 rakasýni í veglínunni auk

Þess sem mýrardýpt er þekkt fyrir veglínuna eftir þéttar boranir á um það bil 30-50 m bili, sjá mynd 8.6 (Haraldur Sigursteinsson, 2016).



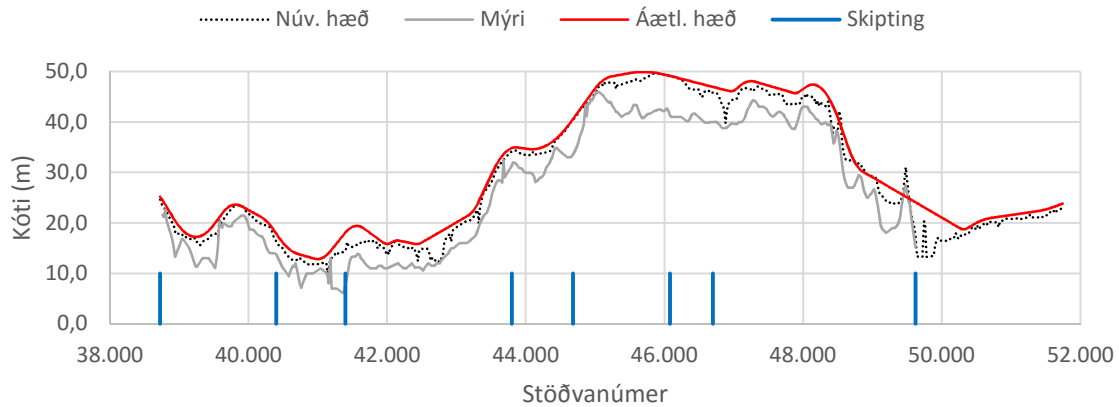
Mynd 8.6: Mýrarþykkt á þeim svæðum þar sem mýrar varð vart og mældur raki rakasýna.

Þykkt mýrarinnar undir væntanlegu vegstæði er afar óregluleg og er allt frá því að vera engin upp í 8,2 m. Reyndist mýrardýptin vera að meðaltali 3,9 m. Rakasýnin voru tekin að meðaltali á 1,1 m dýpi. Meðaltalsraki reyndist vera $\bar{w} = 370\%$ með hámarksraka upp á $w_{max} = 584\%$ og lágmarksraka upp á $w_{min} = 225\%$ (Haraldur Sigursteinsson, 2016).

Ef tekið er mið af reynslulíkingum sem lagðar voru fram í kafla 7.3 má sjá að hægt er að áætla módultöluna á bilinu 4-6,5 og tímamótstöðustuðul á bilinu 50-100. Stemmur það ágætlega við niðurstöðurnar frá árinu 1972 og verða þær niðurstöður því notaðar við sigreikningana. Þó er breitt bil gilda í reynslulíkingunum það mikið að ekki er talinn vera grundvöllur fyrir því að breyta gildum á módultölu og tímamótstöðustuðul eftir mismunandi rakagildum og því verður eitt fast gildi notað.

8.3.3 Forsendur

Áætlað er að gera sigspá fyrir vegkaflann frá Varmá rétt austan Hveragerðis að vesturbakka Ölfusár þar sem ný brú yfir Efri-Laugardælaeyju er áætluð. Kaflinn er í heild 10.897 m að lengd en heildarlengd nýs vegar er áætluð 13,6 km. Þar sem nýr vegur nýtir núverandi veg að hluta verður sigspá skipt upp eftir akbrautum. Upplýsingar um mýrarþykkt eru þekktar frá rannsóknum árið 2009 auk þess sem til eru gögn um núverandi landhæð (eftir akbrautum) og áætlaða hæð nýs vegar eins og sjá má á mynd 8.7 (Haraldur Sigursteinsson, 2016).



Mynd 8.7: Langsnið í áætlaðan Suðurlandsveg. Sýnd er núverandi landhæð miðlinu nýs vegar, áætluð veghæð miðlinu nýs vegar, lega mýrar í vegstæðinu og skipting sigspár.

Ásamt langsniðinu sem sýnt er á mynd 8.7 er lögð þar fram skipting á veginum til sigreikninga. Á myndinni má sjá mikið mýrarsvæði frá stöð 45.000 langleiðina að stöð 48.000 en um það svæði liggur Þórustaðamýri. Nánari greiningu á sigsvæðum má sjá í töflu 8.2.

Tafla 8.2: Skipting greiningarsvæðis fyrir gerð sigspár. Svæðin byrja í vestri og enda í austri.

Nr.	Stöð frá	Stöð til	Lengd (m)	Þversnið	Athugasemd
1	38.723	40.380	1.677	Hálft	Byggja þarf hægri akbraut
2	40.400	41.380	1.000	Hálft	Byggja þarf vinstri akbraut
3	41.400	43.780	2.400	Fullt	Nýr vegur
4	43.800	44.660	880	Hálft	Byggja þarf vinstri akbraut
5	44.680	46.060	1.400	Hálft	Byggja þarf hægri akbraut
6	46.080	46.680	620	Hálft	Byggja þarf vinstri akbraut
7	46.700	49.620	2.920	Fullt	Nýr vegur

Svæði 1 liggur frá Varmá austan Hveragerðis rétt austur fyrir ný mislæg gatnamót við Velli. Svæði 2 liggur um Gljúfurholt og nær að Kotstrandarkirkju. Svæði 3 nær frá Kotstrandarkirkju langleiðina að nýjum mislægum gatnamótum við Hjarðarból. Svæði 4 liggur um Hjarðarból við mislægu gatnamótin og nær að Kögunarhól. Svæði 5 nær frá Kögunarhól að afleggjara að Þórustöðum. Svæði 6 heldur þaðan áfram til austurs allt þar til vegurinn víkur af núverandi veglinu og byggja þarf fullt þversnið. Svæði 7 nær því úr Þórustaðamýri í vestri að vesturbakka Ölfusár í austri. Sigspáin í heild sinni takmarkast af þessum svæðum. Þar sem svæði 5, 6 og 7 liggja að hluta um Þórustaðamýri er fyrir fram hægt að búast við töluverði sigi þar.

Eins og sagði, þá er uppbygging vegarins allt frá því að einungis þurfi að byggja aðra akbrautina yfir í það að byggja þurfi báðar akbrautirnar, það er nýjan 2+2 veg. Notað er meðaltal mýrarþykktar og fyllingarhæðar fyrir hvert og eitt sigsvæði. Aðrar inntaksstærðir í sigreikninga eru skilgreindar eftir rannsóknarniðurstöðum frá 1972, sjá töflu 8.3.

Tafla 8.3: Forsendur notaðar til sigreikninga á Suðurlandsvegi.

Heiti	Breyta	Gildi	Heiti	Breyta	Gildi
Hæð fyllingar	H_f (m)	1,5-2,2	Spennumótstaða	M (kPa)	240,0
Rúmþ. fyllingar	γ_f (kN/m ³)	21,6	Módultala	m (-)	5,0
Vatnsm. fylling	γ_{sat} (kN/m ³)	22,5	Forþéttingarspenna	σ_{pc}' (kPa)	24,0
Þykkt mýrar	H (m)	2,9-6,4	Þéttingarstuðull	c_v (m ² /á)	315,4
Rúmþ. mýrar	γ_m (kN/m ³)	10,4	Tímamótstöðustuðull	r_s (-)	70
Staða grunnv.	H_{gv} (m)	0,5	Viðmiðunartími	t_r (-)	0,00

Álag sem verkar ofan á mýrina sökum fyllingar er miðað við breidd akbrautar og fláa 1:2 út frá akbrautarenda. Álagsbreidd fæst sem:

$$B = b + 4 \cdot H_f \quad (8.1)$$

Þar sem b er breidd akbrautarinnar, sem er hér 11,5 m. Álag sem verkur á mýrina er síðan reiknað út frá álagsbreidd, hæð fyllingar og rúmþyngd fyllingar:

$$q = \gamma_f \cdot \bar{h} \quad (8.2)$$

Þar sem q er reiknað í kPa og $\bar{h} = (2 \cdot H_f^2 + b \cdot H_f) / B$ er meðalhæð fyllingar að teknu tilliti til fláa. Út frá álagi sem verkar ofan á mýrina er síðan reiknuð meðalspenna í miðri mýrinni samkvæmt jöfnu Boussinesq eins og nefnt var í kafla 5.2.1. Vegna þess að reiknuð er meðalspenna en ekki hámarksspenna í miðri mýrinni verða rúmmálsreikningar nákvæmari en ef sérstaklega væri verið að skoða sigið undir miðri fyllingu þá gæti það verið vanáætlað með þessari aðferð.

Við útreikning á sigmagni er miðað við að sigferill vegarins sé jafn út frá miðju að vegöxl, en þaðan er gert ráð fyrir fláa 1:2. Flatarmál sigs undir þversniði vegarins er reiknað sem:

$$A_s = (b + 2 \cdot s_T) s_T \quad (8.3)$$

Þar sem s_T er heildarsig, það er skammtímasig og 20 ára langtímasig.

Reiknað skammtímasig er síðan leiðrétt vegna láréttra formbreytinga en reynsla hefur sýnt að mælt sig er ætíð örlítið meira heldur en reiknað sig. Stærðargráða skammtímasigs er því aukin samkvæmt eftirfarandi jöfnu, fyrir $\Delta\sigma' \geq \sigma_{pc}'$ (Haraldur Sigursteinsson, 1974):

$$\Delta\varepsilon_p = 1,1 + 0,0013(\Delta\sigma' - \sigma_{pc}') - 0,102 \quad (8.4)$$

Þar sem $\Delta\varepsilon_p$ er hlutfallsleg aukning formbreytingar skammtímasigs, $\Delta\sigma'$ er spennuaukning og σ_{pc}' er forþéttingarspenna.

Þá er skammtímasig reiknað með endurtekinni nálgun, þ.e.a.s. fyrst reiknað út frá hannaðri fyllingu og síðan endurreiknað frá þeim fyllingarauka sem kemur til vegna skamm- og langtímasigs.

8.3.4 Sigspá eftir vegköflum

Þegar áður nefndar forsendur eru settar inn í kóðann sem nefndur var í kafla 5.6 fást eftirfarandi niðurstöður, sjá töflu 8.4. Miðað er við að álag í miðri mýrinni mitt undir álaginu við fyrsta fyllingarlag sé ekki hærra en 20 kPa og við seinni lög ekki hærra en 30 kPa hvert svo ekki sé hætt á skúfbroti í mýrinni.

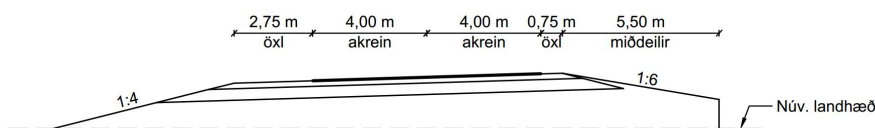
Tafla 8.4: Niðurstöður sigspár fyrir greiningarsvæðið á Suðurlandsvegi. Langtímasig er reiknað við 20 ár.

Nr.	Mýrardýpt (m)	Fylling (m)	Skammtímasig (m)	Langtímasig (m)	Heildarsig (m)	Rúmmál (m ³)
1	2,89	1,44	0,42	0,30	0,71	15.432
2	3,37	1,87	0,60	0,32	0,92	12.334
3v	3,46	1,83	0,61	0,33	0,94	30.222
3h		1,81	0,61	0,33	0,94	30.075
4	3,71	1,52	0,58	0,35	0,93	10.987
5	5,05	2,05	1,03	0,43	1,46	29.450
6	6,42	2,15	1,34	0,50	1,84	17.352
7v	3,82	1,50	0,60	0,36	0,96	37.485
7h		1,84	0,69	0,35	1,04	41.377

Áætlað heildarsig í veglínunni er um 225.000 m³ en sú stærð getur verið á reiki þar sem hún veltur að stórum hluta á því yfir hversu breitt svæði áætlað er að sigið nái til. Sigið er mikið á svæðum númer 5 og 6, skammtímasig yfir 1 m, en þau svæði liggja um Þórustaðamýri. Vegna langtímasigs þarf að fara í aðgerðir til þess að lágmarka áhrif þess. Er ráðlagt að setja yfirálag (farg) á mýrina til þess að reyna ná fram langtímasigi sem er ígildi sigi næstu 20 ára á fyrstu 10 mánuðum eftir að fyllingarframkvæmdum við veglagningu hefur lokið. Magn fergingar fer eftir reiknuðu langtímasigi. Eftir 10 mánuði væri farg tekið af og burðar- og slitlag lagt á veginn (Haraldur Sigursteinsson, 1974). Hins vegar er fyrirliggjandi að í væntanlegu vegstæði er mikið um skurði bæði þversum og langsum undir veginum. Slíkar aðstæður eru kjörnar til þess að valda mismunasigi á veginum og þarf því að taka tillit til núverandi skurða á svæðinu við hönnun því þeir geta bæði lengt fergingartímann og aukið magn fergingar.

8.3.5 Kennisnið

Annað afbrigði af sigspá er að skoða skamm- og langtímasig út frá gefnu kennisniði. Slíkt kennisnið ætti að vera lýsandi fyrir veginn. Á mynd 8.8 má sjá kennisnið fyrir aðra akbraut nýs Suðurlandsvegar.



Mynd 8.8: Kennisnið fyrir aðra akbraut nýs Suðurlandsvegar.

Með því að hafa fyllingarhæð breytilega er hægt að gefa út sigspá fyrir mismunandi álag á veginn. Eins og áður er gert ráð fyrir að álag frá fyllingu verki frá vegöxlum með fláa 1:2.

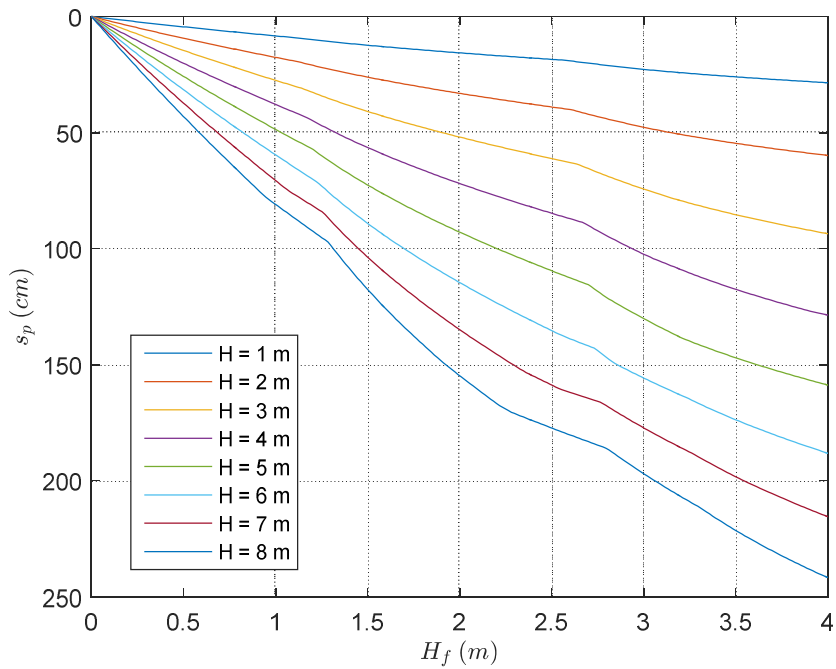
8.3.6 Sigspá út frá kennisniði

Með sömu forsendur og áður er hægt að útbúa sigspá út frá kennisniðinu á mynd 8.8 miðað við gefnar þykktir á mýri og mismunandi álag (fyllingarhæð). Er sigspáin ákvörðuð miðað við þrepauppbyggingu eins og áður þannig að spennan í miðri mýrinni í fyrsta þrepi fari ekki yfir 20 kPa og í síðari þrepum fari spennan ekki yfir 30 kPa í hverju þrepi. Viðeigandi fyllingarþykktir má sjá í töflu 8.5.

Tafla 8.5: Fyllingarþykktir út frá mismunandi mýrarþykktum og tveimur álagsþrepum.

H (m)	20 kPa	30 kPa
	H _f (m)	H _f (m)
1	1,10	1,74
2	1,12	1,78
3	1,15	1,81
4	1,17	1,85
5	1,20	1,89
6	1,23	1,93
7	1,26	1,97
8	1,29	2,01

Hvert skammtímasigið verður miðað við þrepauppbyggingu og mismunandi mýrarþykktir má sjá á mynd 8.9.



Mynd 8.9: Skammtímasig miðað við mismunandi mýrarþykktir og fyllingarhæðir.

Hægt er að sjá á mynd 8.9 nokkuð auðkennandi brot í ferlunum á tveimur stöðum. Það fyrra er vegna þrepauppbyggingarinnar en hið síðara vegna forþéttingarspennunnar. Þegar álagsaukningin verður hærri en forþéttingarspennan í jarðveginum reiknast sigið á annan hátt heldur en á forþéttingarsvæðinu eins og kynnt var í kafla 5.3.

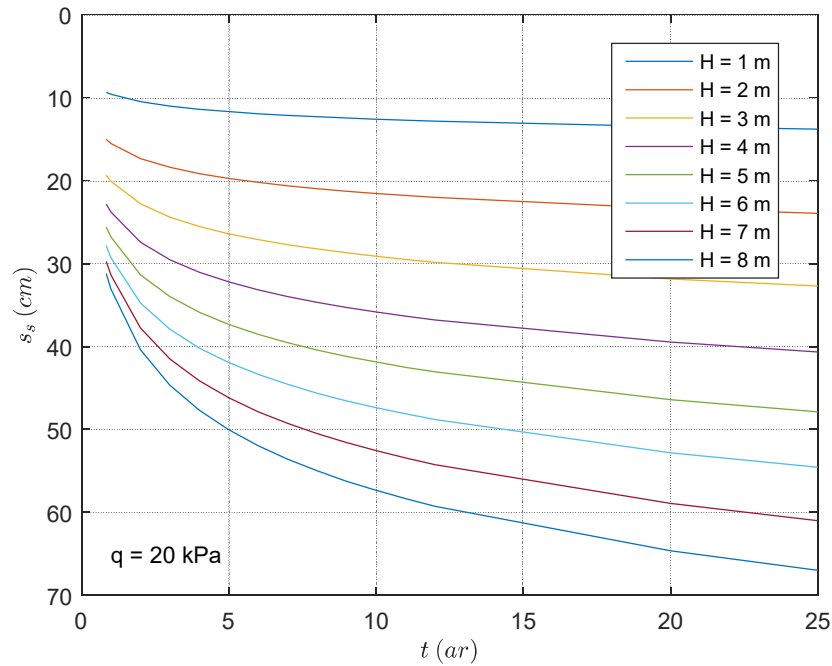
Varðandi tíma sigsins þá er hægt að skoða þéttingartímann. Það er sá tími sem það tekur vatnsþrýsting í mýrinni að jafnast út. Þéttingartíma má sjá í töflu 8.6.

Tafla 8.6: Þéttingartími út frá gefnum mýrarþykktum.

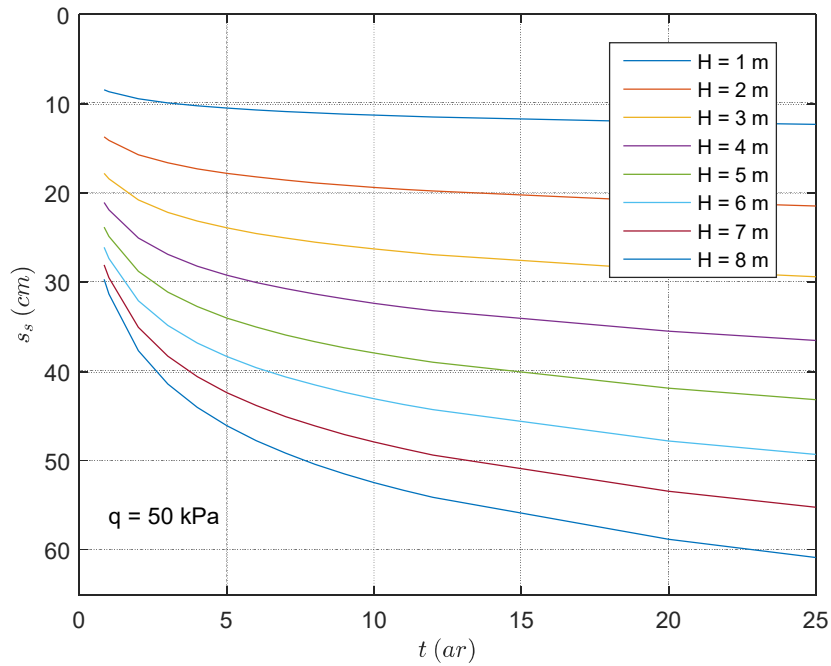
H (m)	t _p (dagar)
1	0,3
2	1,2
3	2,6
4	4,6
5	7,2
6	10,4
7	14,2
8	18,5

Þéttingartíminn er miðaður við fyrsta álagsþrepið en við síðari þrep þarf að ákvarða nýjan þéttingartíma vegna þess að mýrarþykktin hefur minnkað vegna sigsins. Þar sem mýrin er töluvert lek er þéttingartíminn frekar stuttur. Í hefðbundinni framkvæmd er miðað við að óhætt sé að leggja næsta þrep þegar 50-70% þétting hefur átt sér stað. Verkframkvæmd ætti því ekki að tefjast vegna konsolideringar mýrarinnar.

Á svipaðan hátt og skammtímaspáin var ákvörðuð er hægt að útbúa sigspá vegna langtímasigs. Langtímasigspána er þó einungis hægt að setja fram miðaða við mismunandi mýrarþykkir og föst gildi á álagi. Því voru gerðar tvær sigspár, annars vegar fyrir 20 kPa álag í miðri mýrinni og hins vegar fyrir 50 kPa álag í miðri mýrinni. Þær má nálgast á mynd 8.10 og mynd 8.11.



Mynd 8.10: Sigspá fyrir langtímasig miðað við 20 kPa álag í miðri mýrinni og mismunandi mýrarþykkir.

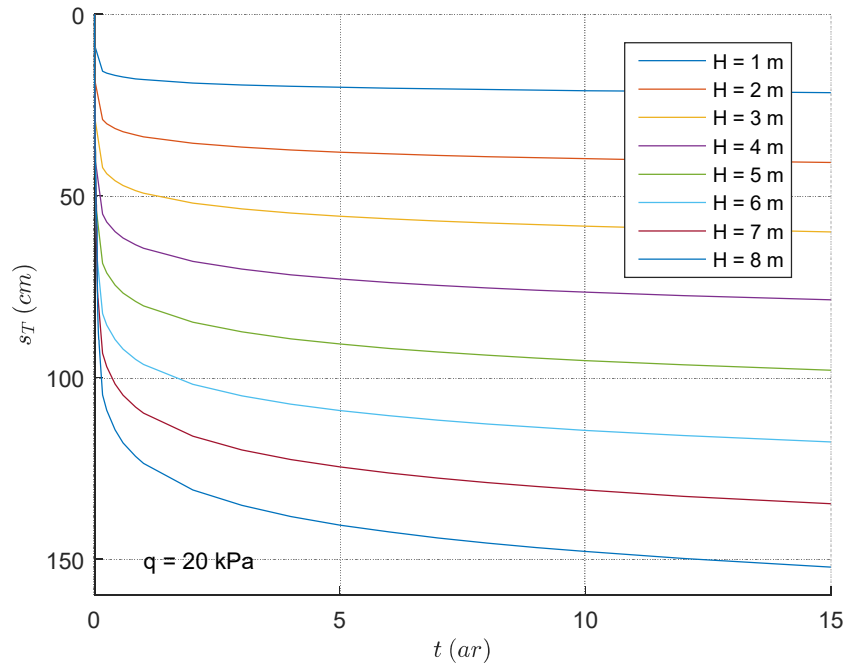


Mynd 8.11: Sigspá fyrir langtímasig miðað við 50 kPa álag í miðri mýrinni og mismunandi mýrarþykktir.

Sjá má þann mismun á spánum tveimur að sigið er meira þegar álagið er 20 kPa heldur en þegar það er 50 kPa. Það sem veldur þeim mismun er að langtímasig er reiknað miðað við þykkt mýrar eins og hún var í lok skammtímasigs. Eftir því sem álag hækkar við ákvörðun á skammtímasigi verður meira sig í mýrinni en það veldur því að þykkt mýrarinnar sem langtímasigið byggir á verður lægri fyrir hærra álag.

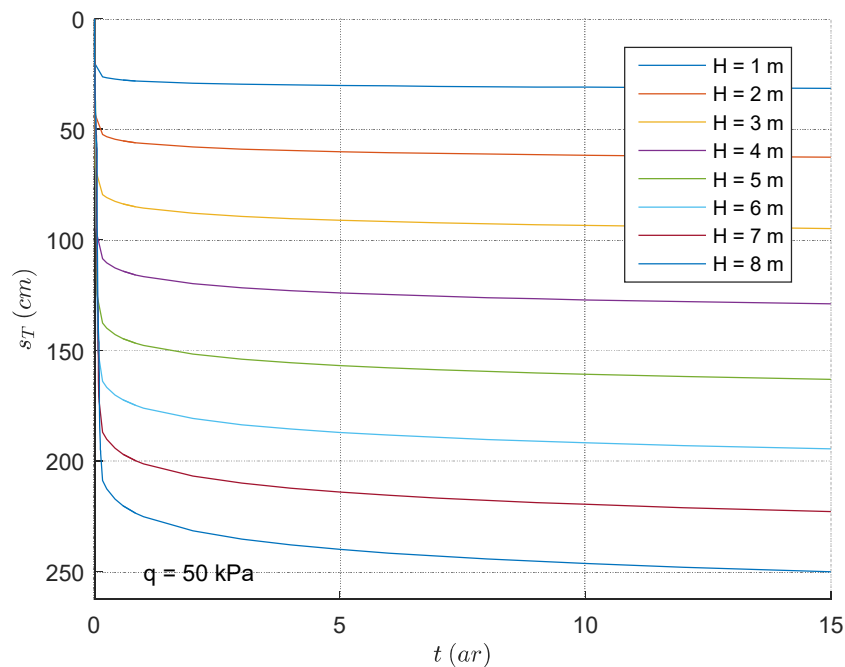
Fyrir lægri mýrarþykktir er halli línu langtímasigsins orðinn lítill við 25 ára tíma sem gefur til kynna að sigið muni ekki verða mikið meira eftir því sem líður á. Fyrir mýrarþykktir ≥ 5 m má áfram búast við sigi af svipaðri stærðargráðu og hefur verið, eins og halli línanna gefur til kynna.

Nú hefur skamm- og langtímasig verið skoðað hvort í sínu lagi en einnig er hægt að skoða samsett sig. Á mynd 8.12 hefur skamm- og langtímasig verið tekið saman fyrir 20 kPa fyllingarálág.



Mynd 8.12: Samsett skamm- og langtímasig fyrir 20 kPa álag í miðri mýrinni og mismunandi mýrarþykkir.

Þá má sjá á mynd 8.12 að eftir 10 ár, fyrir mýri sem er 5 m þykk og álag 20 kPa (1,2 m fylling) að heildarsigið er í kringum 100 cm. Ef hins vegar álagið er aukið í 50 kPa verður heildarsigið töluvert meira eins og sjá má á mynd 8.13.



Mynd 8.13: Samsett skamm- og langtímasig fyrir 50 kPa álag í miðri mýrinni og mismunandi mýrarþykkir.

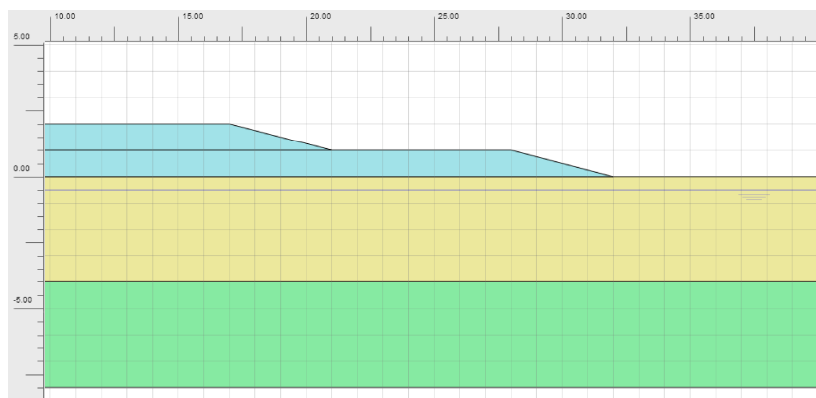
Fyrir sömu mýri og var áður nefnd, 5 m þykk og nú við 50 kPa álag í miðri mýrinni (3,09 m fylling) verður heildarsigið eftir 10 ár í kringum 170 cm. Eins og sést á mynd 8.13 má búast

við lítilli aukningu sigs eftir þann tíma vegna þess hve hallatala línunnar er orðin lág. Slík stærðargráða sigs er þó alls ekki óraunhæf og sýnir þetta fram á hversu nauðsynlegt það er að vanda vel til verks og ná fram langtímasígi innan feringartíma.

8.4 Stöðugleiki fyllingar

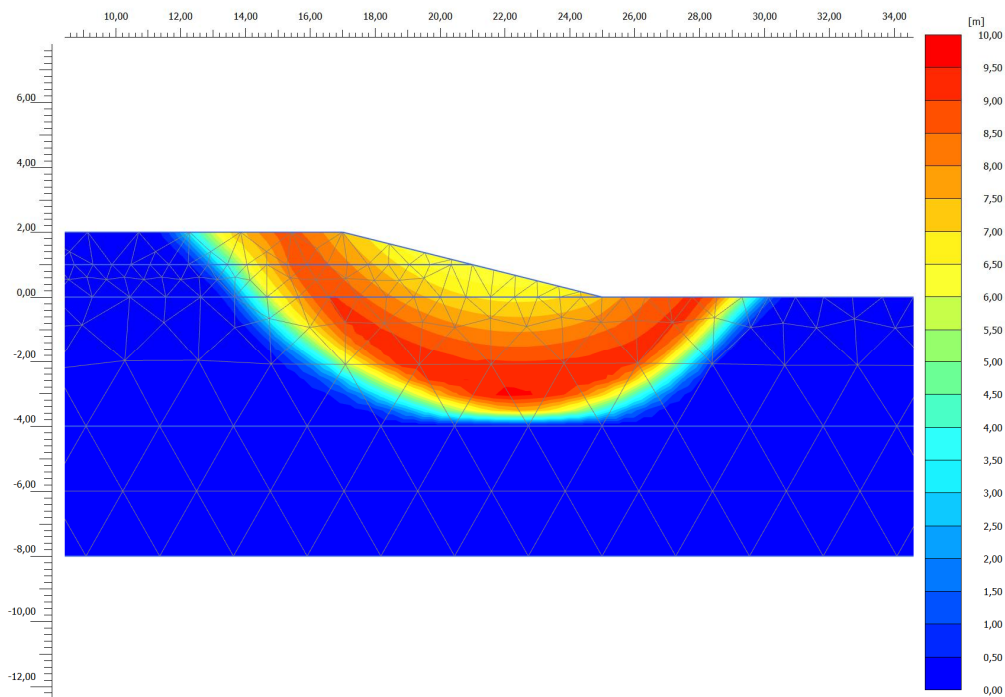
Eins og áður hefur verið vikið að er markmið með þrepauppbyggingu að byggja upp burð í mýrinni hægt og rólega. Mýrarjarðvegur hefur ekki mikinn skúfstyrk að upplagi og með þrepauppbyggingu er minni hætt á skúfbroti heldur en ef fyllingin væri lögð út í einu lagi. Þó getur orðið skrið í fyllingu vegna brots í undirliggjandi mýri meðfram misgengisfleti eins og sýnt var á mynd 4.5. Ef skúfbrot verður í mýrinni opnast svörðurinn og efnisþörf eykst stórkostlega. Því er ætíð reynt að forðast skúfbrot þegar verið er að leggja fljótandi vegi.

Fyrir kennisniðið sem var gefið í kafla 8.3.5 var gerð stöðugleikagreining með forritinu *PLAXIS*. Greiningin líkir eftir óframræstum aðstæðum með því að taka inn stífleika og skúfstyrk mýrarinnar út frá virkum spennum (*PLAXIS*, 2011). Gert var ráð fyrir 2 m hárrí fyllingu ofan á 4 m þykka mýri sem lögð væri út í tveimur þrepum, hvort þrep 1 m, sjá mynd 8.14. Fyrri fyllingin væri lögð út yfir tvo daga en sú seinni yfir einn dag með útjöfnun vatnsþrýstings á milli.



Mynd 8.14: Skilgreint þversnið með þétu sandlagi neðst, síðan mýrarlag og efst fylling sem lögð er út í tveimur þrepum.

Reynt var að nota svipaða efniseiginleika í fyllingu og mýri og voru notaðar í sigspánni. Við ákvörðun á skúfstyrk mýrarinnar var tekið mið af því sem talað var um í kafla 6.2.1. Þó er mýrin yfirkonsoliduð og því var samloðunin hækkuð í 4 kPa og viðnámshornið lækkað niður í 10°. Lekt í mýrinni var sett sem sú sama og fékkst með rannsóknum árið 1972, 0,0324 m/dag. Niðurstöðu fyrir skrið fyllingarinnar má sjá á mynd 8.15.



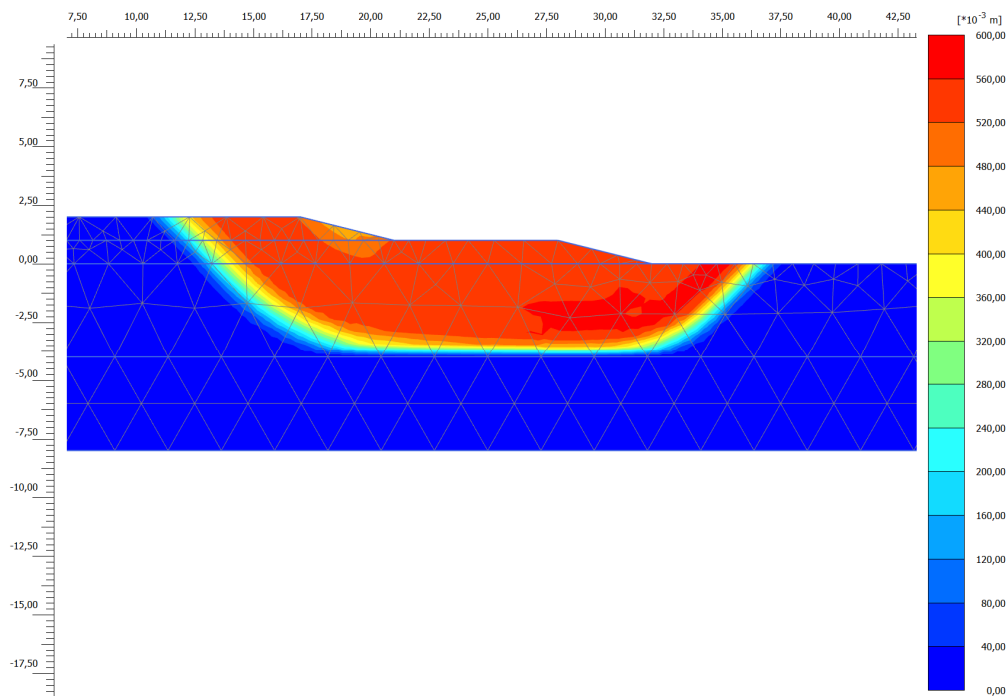
Mynd 8.15: Skrið fyllingar eftir misgengisfleti.

Eins og mynd 8.15 sýnir nær brotflöturinn niður í botn mýrarinnar. Varðandi öryggisstuðul slíkrar fyllingar þá eru öryggisstuðlar í *PLAXIS* reiknaðir sem (*PLAXIS*, 2011):

$$F_s = \frac{\tan(\varphi')}{\tan(\varphi'_{\text{minnkað}})} = \frac{c'}{c'_{\text{minnkað}}} \quad (8.5)$$

Efnisstuðlar jarðvegsins, viðnámshorn og samloðun eru þannig minnkaðir þangað til viðunandi jafnvægi fæst.

Ákvarðaður öryggisstuðull var $F_s = 1,16$. Öryggisstuðullinn er ekki ásættanlegur, þyrfti að vera hærri en 1,25 og þarf því að grípa til aðgerða. Með því að leggja mótfyllingu til hliðar við núverandi fyllingu sem er 1 m á hæð og 3 m á breidd fyrir utan fláa hækkar öryggisstuðullinn. Nýja brotmynd má sjá á mynd 8.16.



Mynd 8.16: Skrið fyllingar eftir útlögn mótfyllingar. Hætta á skriði er nær engin.

Öryggisstuðullinn eftir þessa aðgerð er $F_s = 1,53$ sem er orðið vel ásættanlegt.

8.5 Túlkun niðurstaðna

Þær niðurstöður sem hér hafa verið lagðar fram felast í sigspá fyrir nýjan tvöfaldaðan Suðurlandsveg milli Hveragerðis og Selfoss auk stöðugleikagreiningu fyllingar. Sigspá var skipt upp í skamm- og langtímasigspá. Sigspá fyrir veginn í heild sinni var unnin eftir vegköflum sem veginum var skipt upp í. Einungis var unnin sigspá fyrir þann hluta vegarins þar sem þurfti að byggja nýja akbraut, það er að segja ekki var tekið tillit til mögulegs sigs ef hækka þyrfti núverandi veg. Reyndist heildarsig með þessari aðferðafræði vera í kringum 225.000 m^3 .

Þessi stærðargráða sigs hefur áhrif á kostnaðarhlíð verksins. Kostnaðurinn var metinn út frá tveimur aðferðum; Byggingarlykli Hannarrs og Vegagerðinni. Samkvæmt Byggingarlykli Hannarrs (2016) má gera ráð fyrir að kostnaður á einn rúmmetra fyllingarefnis með efnisflutningum sé 2.165 kr. Í heild gerir það 487 milljónir króna. Þó er ekki hægt að stilla af akstursvegalengdir með þessari aðferð sem veldur ákveðinni óvissu. Samkvæmt upplýsingum frá Vegagerðinni tekur þeirra verðlíkan inn meðalakstursfjarlægð frá námu að losunarstað. Miðað við að efni sé sótt í Þórstaðanámu var meðalakstursfjarlægð ákvörðuð 2,5 km. Það gerir kostnað upp á 650 milljónir króna. Upphæðin er há en er þó líkast til einungis innan við 6% af kostnaði framkvæmdarinnar í heild sinni (EFLA verkfræðistofa, 2010). Vegna reiknaðs langtímasigs þarf að fergja veginn og er ráðlagt að gera það í minnst tíu mánuði vegna þess landslags sem er ríkjandi, en mikið er um skurði í væntanlegu vegstæði.

Til grundvallar skamm- og langtímasigspám voru notaðar rannsóknarniðurstöður frá 1972 og kennisnið fyrir akbraut nýs vegar. Rannsóknarniðurstöðurnar gáfu til kynna frekar háa

spennumótstöðu mýrarinnar en það er í samræmi við ályktun Haraldar Sigursteinssonar (1974) um að mýrar með háa spennumótstöðu ($M = 200-300$ kPa) væru almennt þurrar, sundurgrafnar af skurðum og greiðar yfirferðar. Þá reyndist lekt í mýrinni vera töluvert há sem er ekki óalgengt fyrir íslenskar mýrar vegna ösku- og steinefnalaga í þeim. Kennisniðið sem var lagt fram fyrir aðra akbraut vegarins gerði ráð fyrir að fyrir hina akbrautina mætti nota sömu niðurstöðu, þ.e. spegla mætti þversniðinu með sigi um miðlínu nýs vegar.

Skammtímasigspá sem var unnin fyrir slíkt kennisnið og þær rannsóknarniðurstöður sem fengust árið 1972 gáfu til kynna við 1,5 m háa fyllingu og 5 m þykka mýri að von væri á 75 cm skammtímasigi. Tími þéttingar fyrir mýrina er tiltölulega lágur vegna hárrar lektar en fyrir slíka mýrarþykkt væri hann sjö dagar fyrir fyrsta þrep. Þá reyndist 20 ára langtímasig fyrir þessar forsendur tæpir 50 cm.

Stöðugleikagreining á skriði fyllingar var unnin með forritinu *PLAXIS*. Upphafleg greining gaf til kynna of lágan öryggisstuðul og því var ákveðið að sjá hver áhrif mótfyllingar við hlið núverandi fyllingar myndi hafa á öryggisstuðulinn. Reyndist sú aðgerð vel, enda jókst öryggisstuðullinn um 30% við útlögn tiltölulega smárrar mótfyllingar. Notuð gildi á skúfstyrk voru hins vegar metin út frá keimlíkri mýri í Kanada og því væri æskilegt, til þess að gera reikningana nákvæmari, að framkvæma próf á mýrinni til þess að öðlast betra gildi á skúfstyrknum.

9 Lokaorð

Í upphafi ritgerðarinnar var vikið að því að mýrar á Íslandi væru almennt séð frekar trefjaríkar og ekki komnar langt í ummyndunarferlinu. Þær finnast helst í fornum tjarnar- eða vatnsstaðum eða á svæðum þar sem grunnvatnsstaða er há. Vegna lítillar ummyndunar er styrkur íslenskra mýra hærrí heldur en í mýrum í nágrannalöndum. Þá er lekt mýranna meiri vegna tiltölulega hás ösku- og steinefnainnihalds. Vegna hás trefjainnihalds hefur yfirborð mýranna sýnt svipaða virkni og notkun jarðneta á ummyndaðar mýrar. Vegna þessa og hversu mýrin er steinefnarík hefur reynst vel á Íslandi að byggja vegi sem látnir eru fljóta á mýrinni.

Vegir þurfa að standa á traustri undirstöðu svo þeir aflagist ekki og skerði umferðaröryggi og því þarf að ákvarða sigspár sem hægt er að styðjast við í hönnun og framkvæmd. Slíkar sigspár hafa verið reiknaðar með aðferð sem kennd er við Nilmar Janbu. Aðferð hans hefur reynst vel í vegagerð á Íslandi og því var ákveðið að beita aðferðinni í þessari ritgerð.

Fyrir skammtímasig er samkvæmt aðferðinni skilgreind spennumótstaða og út frá henni og móðultölu er hægt að reikna sig mýrar á forþéttingar- og jómfrúarsvæði. Tímalengd skammtímasigs fékkst síðan með endurbættri útgáfu á þéttingarkenningu Terzaghi's. Þá skilgreindi Janbu tímamótstöðu vegna ákvörðunar á langtímasigi. Þær inntaksstærðir sem nota þarf í ákvörðun skamm- og langtímasigs fást með rannsóknum á mýrarsýnum.

Á Íslandi hefur verið notast við umbreytt ödometerpróf til ákvörðunar á sigeiginleikum mýrarjarðvegs, en þá eru sýnin innsiglið í þunna málmhólk svo raki sleppi ekki burtu og prófið framkvæmt þar sem hliðarfærslur eru hindraðar. Niðurstöður hafa staðfest að íslenskar mýrar eru töluvert lekar og fljótar að konsoliderast. Aðferð Janbu's og eldri niðurstöður ásamt nýrri rannsóknarniðurstöðum var síðan beitt við gerð sigspár fyrir nýjan tvöfaldaðan Suðurlandsveg sem áætlaður er milli Hveragerðis og Selfoss.

Áætlað sig er í kringum 225.000 m³ á þeirri veglínu og áætlaður kostnaður vegna aukinna fyllinga er í kringum 650 milljónir króna. Sá kostnaður getur þó breyst til hækkunar eða lækkunar með nákvæmari sigspá. Þá kom í ljós eftir reikninga á langtímasigi að nauðsynlegt er að fergja vegstæðið til þess að ná fram langtímasigi á feringartíma og lágmarka áhrif sigs eftir að vegur hefur verið byggður. Vegna mikils fjölda skurða langsum og þversum undir nýju vegstæði er töluvert hætta á mismunasigi og því þarf að taka áhrif þeirra inn í mat á feringartímanum. Tímalengd feringar gæti verið um tíu mánuðir og magn fer eftir reiknuðu langtímasigi en þó þarf ætíð að taka tillit til aðstæðna á staðnum sem geta bæði lengt feringartímann og aukið magn feringar.

Á þeim svæðum þar sem mýrardýpt er mikil og nauðsyn á háum fyllingum getur verið hætta á skriði fyllingar vegna skúfbrots í undirliggjandi mýri. Slíkar aðstæður er ætíð reynt að forðast þegar verið er að leggja fljótandi vegi og því var skrið fyllingar greint m.t.t. öryggisstuðuls. Öryggisstuðull fyrir 2 m háa fyllingu á 4 m þykkri mýri reyndist ófullnægjandi og var því lögð 1 m há mótfylling til hliðar við núverandi fyllingu sem gerði fyllinguna stöðuga m.t.t. öryggisstuðuls. Nánari rannsóknir á skúfstyrk mýrarinnar eru þó nauðsynlegar til þess að staðfesta þetta.

Markmið sem lögð voru fram í upphafi þessarar ritgerðar fólu meðal annars í sér að skrásett yrði sú aðferðafræði sem notuð er við sigreikninga hér á landi og hvað ber að hafa í huga og hvaða valkostir séu í boði við vegagerð um mýrlendi. Einnig að þeirri þekkingu yrði beitt á raunverulegt dæmi. Er það skoðun höfundar að vel hafi tekist til þó ætíð sé hægt að skoða hlutina nánar og betur. En hér var látið nægja að sinni.

Heimildir

- Arnþór Garðarsson, Borgþór Magnússon, Einar Ó. Þorleifsson, Hlynur Óskarsson, Jóhann Óli Hilmarsson, Niels Árni Lund, . . . Trausti Baldursson. (2006). *Endurheimt votlendis 1996-2006*. Reykjavík: Landbúnaðarráðuneytið.
- Das, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering*. Stamford: Cengage Learning.
- Das, B. M., og Sobhan, K. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering*. Stamford: Cengage Learning.
- Dóra Hafsteinsdóttir og Sigríður Harðardóttir (ritstj.). (1990). *Íslenska alfræðiorðabókin A-Ö*. Reykjavík: Örn og Örlygur hf.
- EFLA verkfræðistofa. (2010). *Suðurlandsvegur frá Hveragerði og austur fyrir Selfoss - matsskýrsla*. Reykjavík: Vegagerðin.
- European Committee For Standardization. (2007). *Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing*. Brussels: CEN. Sótt frá http://www.persona.uk.com/a21Ton/Core_dox/S/S3.pdf
- Geonor. (e.d.). *Borerigger*. Sótt 15. mars 2016 frá <http://geonor.no/borerigger/>
- Grande, L. og Senneset, K. (2015). Obituary Nilmar Janbu. *Géotechnique*, 63(10), 892-893. doi:10.1680/geot.13.OB.01
- Grétar Guðbergsson og Þorleifur Einarsson. (1998). Flokkun og jarðvegseiginleikar mýra. Í Jón S. Ólafsson (ritstj.), *Íslensk votlendi, verndun og nýting* (bls. 79-87). Reykjavík: Háskólaútgáfan.
- Guðmundur Valur Guðmundsson. (2016). *Hringvegur, Hveragerði-Selfoss*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Hannarr ehf. (2016). *Byggingarlykill Hannarrs*. Reykjavík: Hannarr ehf.
- Haraldur Sigursteinsson. (1974). *Jarðvegsathuganir vegna hönnunar hraðbrautar á Kjalarnesi*. Reykjavík: Tækniskóli Íslands.
- Haraldur Sigursteinsson. (2010). *D5 Roads on Peat*. Reykjavík: ROAD EX.
- Haraldur Sigursteinsson. (2016). *Hæðir, sigspá, borholur - gögn*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Haraldur Sigursteinsson, Jón Skúlason og Sverrir Örvar Sverrisson. (2015). *Jarðtæknirannsóknir fyrir vega- og brúagerð*. Reykjavík: Vegagerðin.

- Heiri, O., Lotter, A. F. og Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25(1), 101-110.
- Helgi Hallgrímsson. (1975). Hugleiðing um vernd mýrlendis. Í Arnþór Garðarsson (ritstj.), *Votlendi* (bls. 169-186). Reykjavík: Landvernd.
- Hlynur Óskarsson. (2010). *Votlendi á Íslandi*. Sótt 5. mars 2016 frá https://www.umhverfisraduneyti.is/media/PDF_skrar/VotlendiHlynurOskarsson.pdf
- Janbu, N. (1970). *Grunnlag i geoteknikk*. Þrándheimur: Tapir Forlag.
- Jón Skúlason. (1978). *Rannsóknir á sigeiginleikum efna ákvörðuðum í ödometer*. Reykjavík: Vegagerð ríkisins.
- Jón Skúlason. (1992). Sig fyllinga á mýri. Í Birgir Jónsson (ritstj.), *Árbók VFÍ 1990/91* (bls. 154-160). Reykjavík: Verkfræðingafélag Íslands.
- Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson. (1972). *Jarðvegsrannsóknir á Þórustaðamýri í Ölfusi og samanburður á reiknuðu og mældu sigi vegfyllingar*. Reykjavík: Verkfræðistofa Dr. Gunnars Sigurðssonar.
- Jón Skúlason og Jón Rögnvaldsson. (1972). *Rannsóknir á sigi mýrarjarðvegs*. Reykjavík: Verkfræðistofa Dr. Gunnars Sigurðssonar.
- Karlsson, R. og Hansbo, S. (1989). *Soil classification and identification*. Stokkhólmur: Swedish Council for Building Research.
- Landform ehf. (2006). *Aðalskipulag Hveragerðisbæjar 2005-2017*. Sótt 25. mars 2016 frá http://www.hveragerdi.is/content/files/public/_PDF/_t%C3%A6knideild/Hvg-tillaga12-undirr_adalskipulag-04-igildi.pdf
- Landva, A. og La Rochelle, P. (1983). Compressibility and Shear Characteristics of Radforth Peats. Í P. M. Jarrett (ritstj.), *Testing of Peats and Organic Soils* (bls. 157-191). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Lög um samgönguáætlun nr. 33/2008.
- Munro, R. (2004). *Dealing with Bearing Capacity Problems on Low Volume Roads Constructed on Peat*. Inverness: The Highland Council, Transport, Environmental & Community Service.
- Murthy, V. (2002). *Geotechnical Engineering - Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Oddur Þórðarson. (1996). *Ödometermælingar - Vesturlandsvegur 501-50*. Reykjavík: Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins.
- Óttar Geirsson. (1975). Framræsla. Í Arnþór Garðarsson (ritstj.), *Votlendi* (bls. 143-154). Reykjavík: Landvernd.

- PLAXIS. (2011). *PLAXIS 2D Reference Manual*. Sótt 20. apríl 2016 frá <http://wildeanalysis.co.uk/system/downloads/219/original/PLAXIS-2D2011-2-Reference.pdf?1327919365>
- ROADDEX Network. (e.d.). *5. Engineering Considerations of Peat*. Sótt 15. mars 2016 frá <http://www.roadex.org/e-learning/lessons/roads-on-peat/engineering-considerations-of-peat/>
- Sigurður Erlingsson. (2011). *BYG501G Jarðtækni og grundun 1 - Fyrirlestraróttur*. Reykjavík: Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands.
- Sigurður Erlingsson. (2014). *BYG116F Soil Mechanics and Foundation Engineering 2 - Lecture notes*. Reykjavík: Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands.
- Steindór Steindórsson. (1975). Um íslenskan mýrlendisgróður. Í Arnþór Garðarsson (ritstj.), *Votlendi* (bls. 22-41). Reykjavík: Landvernd.
- Steinsholt. (2016). *Flóahreppur, Aðalskipulag 2015-2028, Sveitarfélagsuppráttur*. Sótt 25. mars 2016 frá <http://www.floahreppur.is/wp-content/uploads/2015/06/Adalskipulagsupprattur-feb-2016-dr%C3%B6g.pdf>
- Steinsholt og Landmótun. (2012). *Sveitarfélagið Ölfus, Aðalskipulag 2010-2022, Suðurlandsvegur og aðliggjandi byggð*. Sótt 25. mars 2016 frá <http://www.olfus.is/media/adalskipulag-olfuss-2010-2022/Sudurlandsvegur-og-adliggjandi-byggd.pdf>
- Sturla Friðriksson. (1973). *Líf og land: Um vistfræði Íslands*. Reykjavík: Varði.
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Trausti Baldursson og Ólafur Einarsson. (31. janúar 1998). Verndun votlendis. *Lesbók Morgunblaðsins*, bls. 14-15.
- Vegagerðin. (2010a). *Leiðbeiningar um mælingar í vegagerð*. (Jón Sverrir Erlingsson, ritstj.) Reykjavík: Vegagerðin.
- Vegagerðin. (2010b). Starfsmaður í nærmynd. *Vegagerðin innanhúss*, 8(447), 1-9.
- Vegagerðin. (2011). *Veghönnunarreglur - 02 Þversnið*. Sótt 4. mars 2016 frá [http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/VhRg02_THversnid/\\$file/VhRg02_Thversnid_2011.pdf](http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/VhRg02_THversnid/$file/VhRg02_Thversnid_2011.pdf)
- Vegagerðin. (2012). *Samgönguáætlun 2011-2022 - Kynningarrit*. (Þorsteinn R. Hermannsson, ritstj.) Reykjavík: Vegagerðin. Sótt frá https://www.innanrikisraduneyti.is/media/frettir-2013/Samgonguaaetlun_kynningarrit_vefutgafa.pdf
- Vegagerðin. (2015a). *Skipting þjóðvega í vegflokka*. Sótt 6. mars 2016 frá [http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/Vegflokka_skipting_2015/\\$file/Vegflokkar_2015.pdf](http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/Vegflokka_skipting_2015/$file/Vegflokkar_2015.pdf)

- Vegagerðin. (2015b). *Umferðartölur 2014*. Sótt 21. mars 2016 frá [http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/Banki_28052015_a_netid/\\$file/Banki_28052015_%C3%A1_net%C3%B0.pdf](http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/Banki_28052015_a_netid/$file/Banki_28052015_%C3%A1_net%C3%B0.pdf)
- Vegagerðin. (2016). *Efnisrannsóknir og efniskröfur*. (Gunnar Bjarnason, ritstj.) Reykjavík: Vegagerðin.
- Vegagerðin. (e.d.). *Bundið slitlag*. Sótt 8. mars 2016 frá <http://www.vegagerdin.is/vegakerfid/slitlog/>
- Vegalög nr. 80/2007.
- Vinnustofan Þverá. (2010). *Árborg, Aðalskipulag 2010-2030*. Sótt 25. mars 2016 frá http://www.arborg.is/wp-content/uploads/2010/01/Arborg_adalsk_2010-30_Selfoss_undirr.pdf
- Vinnustofan Þverá. (2011). *Árborg, aðalskipulag 2010-2030 - greinargerð*. Árborg: Sveitarfélagið Árborg.
- von Post, L. (1921). *Upplýsingar rörande Sveriges Geologiska Undersøknings torvmarksrekognosering*. Stokkhólmur: Sveriges Geologiska Undersøkning, serie D, 52.
- Þorleifur Einarsson. (1975). Um myndunarsögu íslensks mýrlendis. Í Arnþór Garðarsson (ritstj.), *Votlendi* (bls. 15-21). Reykjavík: Landvernd.

Viðauki A

Kóðar sem reikna sig samkvæmt aðferðafræði Janbu's.

```
% -----  
%% Skammtímasig  
  
% Þessi kóði reiknar hlutfallslegt skammtímasig út frá:  
% - Álagi sem verkar frá fyllingu (dSi)  
% - Forþéttingarspennu jarðvegsins (si_pc)  
% - Virkri spennu í jarðveginum (Si_eff_0)  
% - Spennumótstöðu (M)  
% - Móðultölu (m)  
  
%%  
% -----  
  
function [e_p] = skammtimasig(dSi,si_pc,Si_eff_0,M,m)  
% Ef spennuaukning er lægri en forþéttingarspenna  
if dSi < si_pc  
    e_p = ((dSi+Si_eff_0)-Si_eff_0)/M;  
% Ef spennuaukning er hærri en forþéttingarspenna OG virk spenna  
% lægri en forþéttingarspenna  
elseif dSi >= si_pc && Si_eff_0 <= si_pc  
    e_p = (((si_pc+Si_eff_0)-Si_eff_0)/M) + (1/m)*log((si_pc + (dSi-  
        si_pc))/si_pc);  
    y = 1.1 + 0.0013*(dSi-si_pc) - 0.102;  
    e_p = e_p * y;  
% Ef virk spenna í jarðveginum er hærri en forþéttingarspennan  
elseif Si_eff_0 > si_pc  
    e_p = (1/m)*log((Si_eff_0 + dSi)/si_pc);  
end  
end  
  
% -----  
% -----  
%% Langtímasig  
  
% Þessi kóði reiknar langtímasig út frá:  
% - Tíma þéttingar, konsolideringstíma (tpd)  
% - Hæð (þykkt) mýrar (H)  
% - Viðmiðunartíma (t_r)  
% - Tímamótstöðutölu (r_s)  
  
% -----  
function [Se,Se_tot,t_lang] = Sigforrit_lang(tpd,H)  
  
% Valin gildi á inntaksstærðir:  
  
% Viðmiðunartími  
t_r = 0.00;  
  
% Tímamótstöðustuðull
```

```

r_s = 70;

% Þéttingartíma breytt úr dögum yfir í ár
tp = tpd/365;

% Tímasambandsstuðull reiknaður
T_r = t_r / tp;

% Reiknaður tími fyrir langtímasig stilltur af
t_lang = [10/12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 20 25];

% Aukatímastuðull reiknaður
T_s = t_lang / tp;

% Aukaþéttingarhlutfall reiknað
U_s = log((T_s - T_r)/(1 - T_r));

% Hlutfallslegt langtímasig
e_s = U_s/r_s;

% Langtímasig í metrum
Se_tot = e_s*(H);

% 20 ára langtímasig
Se = Se_tot(14);

end

% -----
% -----
function [Pr,t50,t70,tpd,H_new] = Sigforrit(H_f,H)
%% Sigforrit
% Sig reiknað samkvæmt eftirfarandi stærðum og inntekinni fyllingarhæð og
mýrarþykkt:

% Almennar inntaksstærðir
% Rúmþyngd fyllingar
ga_f = 21.6;
% Rúmþyngd vatnsmettaðrar fyllingar
ga_sat = 22.5;
% Grunnvatnsstaða
H_gv = 0.5;
% Rúmþyngd mýrar
ga_m = 10.4;
% Rúmþyngd þurrar (rakrar) mýrar
ga_dm = 10.4;
% Forþéttingarspenna
si_pc = 24;
% Spennumótstaða
M = 240;
% Módultala
m = 5;
% Þéttingarstuðull
c_v = 6*52.56; % Breytt í m2/ár

% Breidd akbrautar
b = 11.5;
% Breidd álagsflatar
B = b + 4*H_f;

```

```

H_dr = H/2; % Drenunarleið vatns úr mýrinni
ga_v = 9.81; % Rúmpýngd vatns

%% Útreikningar

% Álag frá fyllingu
alag1 = ga_f*((2*H_f^2 + b*H_f)/B); % Eining kPa

set = 20;
% Reiknum meðalspennu í miðri mýrinni skv. jöfnu Boussinesq
dSi1 = ((2*alag1)/pi)*atan(B/(H/2));

if dSi1 > set
    dSi = set;
    dSi_ne = dSi1 - set;
    alag_ne = (dSi_ne*pi)/(2*atan(B/H));

    a1 = (4/B)*ga_f;
    b1 = (b/B)*ga_f;
    c1 = -alag_ne;
    H_new = (-b1 + sqrt(b1^2 - 4*a1*c1))/(2*a1);
else
    dSi = dSi1;
    H_new = 0;
end

% Reiknum spennuástandið fyrir
Si = [0 ga_dm*H_gv ga_dm*H_gv + ga_m*(H-H_gv)];
u = [0 H_gv*ga_v ga_v*(H-H_gv)];
Si_eff = Si - u;
Si_eff_0 = mean(Si_eff);

%% Skammtímasig
[e_p] = skammtímasig(dSi,si_pc,Si_eff_0,M,m);
s_p0 = e_p * H;
if s_p0 < H_gv
    df = 0;
else
    df = -(s_p0 - H_gv) * (ga_f - (ga_sat - ga_v));
end
dSi_ne = df;
%% Ítrun 1
if dSi_ne == 0
    e_p1 = 0;
else
    [e_p1] = skammtímasig(dSi_ne,si_pc,Si_eff_0,M,m);
end
s_p1 = e_p1 * (H-s_p0);

if (s_p1+s_p0) < H_gv
    df = 0;
else
    df = -s_p1 * (ga_f - (ga_sat - ga_v));
end
dSi_ne = df;
%% Ítrun 2
if dSi_ne == 0
    e_p2 = 0;

```

```

else
    [e_p2] = skammtimasig(dSi_ne,si_pc,Si_eff_0,M,m);
end
s_p2 = e_p2 * (H-(s_p0+s_p1));

if (s_p0+s_p1+s_p2) < H_gv
    df = 0;
else
    df = -s_p2 * (ga_f - (ga_sat - ga_v));
end
dSi_ne = df;
%% Ítrun 3
if dSi_ne == 0
    e_p3 = 0;
else
    [e_p3] = skammtimasig(dSi_ne,si_pc,Si_eff_0,M,m);
end
s_p3 = e_p3 * (H-(s_p0+s_p1+s_p2));

s_p = s_p0+s_p1+s_p2+s_p3;           % Útreiknað skammtímasig

%% Þétting
% Töluleg lausn á endurbættu þéttingarkenningu Janbu's
% r = 0;
n = linspace(1,10000,10000);
N = ((2*n - 1) * pi) / 2;
T_p = [0 0.001 0.002 0.005 0.01 0.02 0.05 0.07 0.1 0.197 0.4 0.7 0.85 1 2
2.84];
% 30% þétting þegar T = 0.07      T(8)
% 50% þétting þegar T = 0.197     T(10)
% 70% þétting þegar T = 0.4       T(11)
% 90% þétting þegar T = 0.85     T(13)

for k = 1:length(T_p)
    ser(k+1) = 0;
    for i = 1:length(N)
        ser(k+1) = ser(k+1) + (1/(N(i).^2)) * exp(-(N(i).^2)*T_p(k));
    end
end

U_p = 1 - 2*ser;
U_p = U_p(2:length(U_p));

% -----
% Reiknum tíma skammtímasigsins og hvert sigið er á þeim tímamarkum
t_p = (H_dr^2/c_v);           % Nálgun á tíma skammtímasigs (í árum)
t_pd = t_p * 365.25;
t = T_p*t_pd;
sp_t = U_p*s_p;

%% Úttaksstærðir
% Skammtímasig
Pr = s_p;

% Sigtími
% 50%
t50 = t(10);
% 70% (biðtími)
t70 = t(11);

```

```

% Tími þéttingar
tpd = t_pd;

end
% -----

% -----
%% Forrit til reikninga á sigi þegar fylling er lögð á í þrepum

% Inntaksstærðir
% Hæð vegar yfir landinu
H_f = 1.84;
% Mýrarþykkt
H = 3.82;

% Köllum á sigreikniforritið
% Reiknum sig miðað við álag upp á 20 kPa fyrst.
% Síðan er rest reiknuð miðað við 30 kPa, ef hún er einhver þ.e.a.s.
[Pr,t50,t70,tpd,H_new] = Sigforrit(H_f,H);
if H_new > 0
    [Pr1,t50_1,t70_1,tpd1,H_f1] = Sigforrit(H_new,(H-Pr));
else
    Pr1 = 0;
end

% Heildar skammtímasig
Pr_tot1 = Pr + Pr1;

[Se] = Sigforrit_lang(tpd,(H-(Pr_tot1)));

% Heildarsig (án fyllingarauka)
Tot1 = Pr_tot1 + Se;

%%
% Reiknum nú sig vegna fyllingarauka frá skamm- og langtímasigi
[Pr2,t50_2,t70_2,tpd2,H_f2] = Sigforrit(Tot1,(H-Tot1));
%%
% Heildarskammtímasigið verður þá
Pr_tot = Pr_tot1 + Pr2;

% Heildarsig (með fyllingarauka)
Tot = Tot1 + Pr2;

% Breidd áhrifasvæðis sigs (áætluð)
b = 11.5;
% Reiknum flatarmál heildarsigs, skammtíma og 20 ára langtímasigs
% Gert er ráð fyrir að sigið nái undir áætlaða breidd akbrautarinnar
% en þaðan með 1:2 halla upp að fláafæti
A_sig = Tot*b + 2*Tot^2;

fprintf('Skammtímasigið er %5.1f cm\n',Pr_tot*100)
fprintf('20 ára langtímasig er %5.1f cm\n',Se*100)
fprintf('Heildarsigið er %5.1f cm\n',Tot*100)
fprintf('Flatarmál sigs í þversniðinu er %4.2f m2\n',A_sig)
fprintf('50% þétting tekur %3.1f daga\n',t50)
fprintf('70% þétting tekur %3.1f daga\n',t70)
fprintf('Þéttingin tekur %3.1f daga\n',tpd)
% -----

```


Viðauki B

Niðurstöður úr álagsprófi sem var framkvæmt 22. apríl 1996. Sýni tekið úr veglínu Vesturlandsvegur.

Ödometermælingar

Dags: 22. apríl
1996
Framkvæmt
af: O.P.

Fyrir: Vegagerðina
Vegna: Vesturlandsvegur 501-50
Verkbeiðandi: Haraldur Sigursteinsson

Stöð 9960 Dýpi 0,85 m Ödometer 11

Hæð:	11,9	cm
Þverskurðarflatarmál:	42,1	cm ²
Rúmmál:	501,0	cm ³
Vot þyngd:	492,7	g
Þurr þyngd:	57,8	g
Þyngd vatns:	434,9	g
Rakagildi:	752,4	%
Rúmþyngd:	0,983	g/cm ³
Þurr rúmþyngd:	0,115	g/cm ³

1. álagsþrep

Nr.	T (klst.)	SDE (%)	T (rót) (klst.)	T (meðal) (klst.)	R
1	0,000	0,00	0,00		
2	0,017	3,82	0,13	0,0	0
3	0,033	4,05	0,18	0,0	7
4	0,067	4,32	0,26	0,1	12
5	0,133	4,59	0,36	0,1	25
6	0,250	4,86	0,50	0,2	43
7	0,500	5,18	0,71	0,4	76
8	1,000	5,62	1,00	0,8	114
9	3,050	6,51	1,75	2,0	230
10	7,000	7,38	2,65	5,0	454
11	24,000	8,74	4,90	15,5	1250

S1	0 kPa		
S2	10,8 kPa	S3=(S1+S2)/2	5,4 kPa
E	8,74 %		
M	124 kPa		

Skýringar:

SDE	sig í % af upphaflegri hæð prufunnar
R	$(T(i)-T(i-1))/(SDE(i)-SDE(i-1))$, ef breyting í sigi er 0 er R sett -1
S1	spennan í undanfarandi álagsþrepi
S2	spennan í þessu álagsþrepi
S3	meðalspennan
E	sig við lok álagsþreps, í % af upphaflegri hæð prufu
M	$(S2-S1)/(E(\text{þetta álagsþrep})-E(\text{síðasta álagsþrep})) * 100$

2. álagsþrep

Nr.	T (klst.)	SDE (%)	T (rót) (klst.)	T (meðal) (klst.)	R
1	0,000	8,74	0,00		
2	0,017	10,86	0,13	0,0	1
3	0,033	11,18	0,18	0,0	5
4	0,067	11,50	0,26	0,1	10
5	0,133	11,94	0,36	0,1	15
6	0,250	12,44	0,50	0,2	23
7	0,500	13,03	0,71	0,4	42
8	1,000	13,65	1,00	0,8	81
9	3,050	14,71	1,75	2,0	189
10	7,000	15,66	2,65	5,0	421
11	24,000	17,27	4,90	15,5	1056

S1	10,8 kPa			
S2	18,6 kPa	S3=(S1+S2)/2	14,7 kPa	
E	17,27 %			
M	91,6 kPa			

Skýringar:

SDE	sig í % af upphaflegri hæð prufunnar
R	$(T(i)-T(i-1))/(SDE(i)-SDE(i-1))$, ef breyting í sigi er 0 er R sett -1
S1	spennan í undanfarandi álagsþrepi
S2	spennan í þessu álagsþrepi
S3	meðalspennan
E	sig við lok álagsþreps, í % af upphaflegri hæð prufu
M	$(S2-S1)/(E(\text{þetta álagsþrep})-E(\text{síðasta álagsþrep}))*100$

3. álagsþrep

Nr.	T (klst.)	SDE (%)	T (rót) (klst.)	T (meðal) (klst.)	R
1	0,000	17,27	0,00		
				0,0	0
2	0,017	21,58	0,13		
				0,0	2
3	0,033	22,61	0,18		
				0,1	3
4	0,067	23,66	0,26		
				0,1	7
5	0,133	24,61	0,36		
				0,2	13
6	0,250	25,50	0,50		
				0,4	27
7	0,500	26,44	0,71		
				0,8	52
8	1,000	27,40	1,00		
				2,0	124
9	3,050	29,02	1,75		
				5,0	315
10	7,000	30,29	2,65		
				15,5	881
11	24,000	32,22	4,90		

S1 18,6 kPa

S2 38,1 kPa

S3=(S1+S2)/2

28,4 kPa

E 32,22 %

M 130,3 kPa

Skýringar:

SDE sig í % af upphaflegri hæð prufunnar

R $(T(i)-T(i-1))/(SDE(i)-SDE(i-1))$, ef breyting í sigi er 0 er R sett -1

S1 spennan í undanfarandi álagsþrepi

S2 spennan í þessu álagsþrepi

S3 meðalspennan

E sig við lok álagsþreps, í % af upphaflegri hæð prufu

M $(S2-S1)/(E(\text{þetta álagsþrep})-E(\text{síðasta álagsþrep})) * 100$

4. álagsþrep

Nr.	T (klst.)	SDE (%)	T (rót) (klst.)	T (meðal) (klst.)	R
1	0,000	32,22	0,00		
2	0,017	37,92	0,13	0,0	0
3	0,033	39,42	0,18	0,0	1
4	0,067	41,06	0,26	0,1	2
5	0,133	42,76	0,36	0,1	4
6	0,250	44,24	0,50	0,2	8
7	0,500	45,74	0,71	0,4	17
8	1,000	47,08	1,00	0,8	37
9	3,050	48,92	1,75	2,0	115
10	7,000	50,04	2,65	5,0	345
11	24,000	51,62	4,90	15,5	1076

S1	38,1 kPa			
S2	103,5 kPa	S3=(S1+S2)/2	70,8 kPa	
E	51,62 %			
M	337,1 kPa			

Skýringar:

SDE	sig í % af upphaflegri hæð prufunnar
R	$(T(i)-T(i-1))/(SDE(i)-SDE(i-1))$, ef breyting í sigi er 0 er R sett -1
S1	spennan í undanfarandi álagsþrepi
S2	spennan í þessu álagsþrepi
S3	meðalspennan
E	sig við lok álagsþreps, í % af upphaflegri hæð prufu
M	$(S2-S1)/(E(\text{þetta álagsþrep})-E(\text{síðasta álagsþrep}))*100$

5. álagsþrep

Nr.	T (klst.)	SDE (%)	T (rót) (klst.)	T (meðal) (klst.)	R
1	0,000	51,62	0,00		
				0,0	1
2	0,017	54,64	0,13		
				0,0	2
3	0,033	55,38	0,18		
				0,1	4
4	0,067	56,30	0,26		
				0,1	6
5	0,133	57,37	0,36		
				0,2	10
6	0,250	58,50	0,50		
				0,4	18
7	0,500	59,87	0,71		
				0,8	35
8	1,000	61,29	1,00		
				2,0	101
9	3,050	63,59	1,75		
				5,0	325
10	7,000	64,74	2,65		
				15,5	1087
11	24,000	66,30	4,90		

S1	103,5 kPa			
S2	299,9 kPa	S3=(S1+S2)/2	201,7 kPa	
E	66,3 %			
M	1337,3 kPa			

Skýringar:

SDE	sig í % af upphaflegri hæð prufunnar
R	$(T(i)-T(i-1))/(SDE(i)-SDE(i-1))$, ef breyting í sigi er 0 er R sett -1
S1	spennan í undanfarandi álagsþrepi
S2	spennan í þessu álagsþrepi
S3	meðalspennan
E	sig við lok álagsþreps, í % af upphaflegri hæð prufu
M	$(S2-S1)/(E(\text{þetta álagsþrep})-E(\text{síðasta álagsþrep})) * 100$

Viðauki C

Efniseiginleikar sýna úr gryfjum 1 og 2 í veglínu Suðurlandsvegur frá árinu 1972.

Suðurlandsvegur - gögn frá rannsóknnum árið 1971

Gryfja	Dýpi (m)	W (%)	Raki (%)	burr rúmþyngd (kN/m ³)	Vot rúmþyngd (kN/m ³)	Glæði-tap (%)	Módul-tala (kPa)	Spennu-mótstaða (kPa)	Módul-tala (m)	C _v (cm ² /mín.)	Péttingar-hraði	Forpéttingar-spenna (kPa)	σ ^c (kPa)	OCR (-)	Yfirþ.hlutff.*	Tímamót-stöðutala	Lekt	k _v (m/dag)
1	0,9	500	1,86	10,30	55	137,3	4,95	6	13,73	9,3	90	0,0346						
45+705	1,45	340	2,26	10,89	44	137,3	4,95	6	13,73	9,3	90	0,0346						
	2,4	405	2,16	10,99	52	294,3	5,05	6	17,66	5,1	80	0,0346						
	2,6	400	2,06	10,30	54	294,3	5,05	6	17,66	5,1	80	0,0346						
	3,4	385	1,96	9,91	61	117,7	4,2	6	15,70	3,4	65	0,0346						
	3,75	760	0,98	9,81	82	117,7	4,2	6	15,70	3,4	65	0,0346						
	4,4	590	1,37	9,81	84	117,7	4,2	6	15,70	3,4	65	0,0346						
Meðaltal		483	1,81	10,3	61,7	173,8	4,7	6,0	15,70	5,57	76	0,0346						
2	1	490	1,86	10,30	54	215,8	4,15	7,2	19,62	17	65	0,0302						
47+200	1,2	320	2,26	10,20	42	215,8	4,15	7,2	19,62	17	65	0,0302						
	1,75	220	3,43	11,38	30	294,3	4,85	7,2	29,43	10	75	0,0302						
	2,15	315	2,55	11,38	47	294,3	4,85	7,2	29,43	10	75	0,0302						
	2,4	320	2,35	10,59	64	294,3	4,85	6	29,43	10	75	0,0302						
	3,4	410	1,96	10,20	58	323,7	5,2	6	39,24	5	92	0,0302						
	4,4	180	3,97	11,28	50	323,7	5,2	6	39,24	5	92	0,0302						
Meðaltal		322	2,63	10,8	49,3	280,3	4,8	6,7	29,43	10,6	77	0,03024						

* Yfirþýstingshlutfall er hlutfall forpéttingarspennu á móti virkri spennu í jarðveginum.

Virk spenna er fengin út frá mældum jarðvatnsþýstingi, ekki reiknuðum.