

Riku-Matti Kurki

MAANVARAISTEN PERUSTUSTEN GEOTEKNINEN MURTORAJATILA-MITOITUS UUDEN EUROKOODI 7:N MUKAISESTI

Kantokestävyys, liukumisvarmuus ja kaatuminen anturaperustuksilla ja kulmatukimuureilla

Diplomityö Rakennetun ympäristön tiedekunta Tarkastajat: Professori Tim Länsivaara Yliopisto-opettaja Mika Knuuti Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Riku-Matti Kurki: Maanvaraisten perustusten geotekninen murtorajatilamitoitus uuden eurokoodi 7:n mukaisesti

Diplomityö Tampereen yliopisto Rakennustekniikka Tammikuu 2024

Suomessa noudatetaan eurokoodeja eli kantavien rakenteiden eurooppalaisia suunnittelustandardeja maanvaraisten perustusten suunnittelussa. Eurokoodien toinen sukupolvi arvioidaan otettavan käyttöön vuosina 2025–2028. Uudet eurokoodit EN 1990 ja EN 1997 vaikuttavat maanvaraisten anturaperustusten ja tukimuurien mitoitustapoihin, osavarmuuslukuihin sekä mitoitusta koskeviin ohjeisiin ja reunaehtoihin.

Tämä diplomityö tutkii, miten uudet mitoitustavat vaikuttavat maanvaraisten sekä kallionvaraisten anturaperustusten ja tukimuurien murtorajatilamitoitukseen ja näiden mittoihin verrattuna nykyisiin mitoitustapoihin. Lisäksi tutkitaan vastaavasti nosturin tukijalan lävistysmurtoa karkearakeisella täytöllä, jonka alla on hienorakeista maata. Tulosten on tarkoitus auttaa Väylävirastoa ja Suomen ympäristöministeriötä tekemään Suomen kansallisia valintoja uusien eurokoodien mitoitustavoista ja osavarmuuslukujen arvoista.

Maanvaraiselle neliöanturalle ja jatkuvalle kulmatukimuurille laskettiin minimileveys kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden murtorajatiloissa (GEO) eri pohjaolosuhteissa ja eri kuormilla. Kallionvaraiselle neliöanturalle ja kulmatukimuurille laskettiin minimileveys staattisen tasapainon (EQU) ja liukumiskestävyyden murtorajatiloissa eri kuormilla. Nosturin tukijalalle laskettiin kantokestävyyden murtorajatilassa (GEO) maksimikuorma eri täyttökerrospaksuuksilla ja tukijalan pohjan ko'oilla. Kantokestävyys ja liukumiskestävyys laskettiin nykyisillä eurokoodi 7:n mitoitustavoilla DA2 ja DA2* sekä uusilla eurokoodi 7:n mitoitustavoilla, jotka koostuvat kuormien osavarmuuslukusarjojen VC1, VC3 ja VC4 ja maan ominaisuuksien (MFA) tai kestävyyden (RFA) osavarmuuslukusarjojen yhdistelmistä. Staattinen tasapaino laskettiin nykyisen eurokoodi 7:n EQUmitoitusmenettelyllä sekä uuden eurokoodi 7:n EQU-mitoitustavalla VC2. Mitoitustapojen tuloksia verrattiin toisiinsa.

Laskelmissa tarkistettiin erinäiset eurokoodien ja kansallisten liitteiden vaatimat reunaehdot. Käyttörajatiloista (SLS) tarkistettiin vain kuormien epäkeskisyys. Tutkimus ei sisällä laskentaa murtorajatiloista, jotka koskevat rakenteen tai rakenneosien sisäistä murtumista (STR), kokonaisvakavuutta, nosteen aiheuttamaa murtumista (UPL) tai hydraulista murtumista (HYD). Laskennat tehtiin analyyttisin menetelmin.

Antura- ja laattaperustusten uudet GEO-murtorajatilan mitoitustavat ovat lähes samat kuin tukirakenteiden. DA2 tuotti aina suuremman tai yhtä suuren leveyden kuin DA2*. Nykyistä mitoitustapaa DA1 vastaava mitoitustapojen (a) VC1+M1 ja (b) VC3+M2 yhdistelmä tuotti keskimäärin 7 % leveämmän neliöanturan kuin DA2*. Mitoitustapojen (a) VC4+M1 ja (b) VC3+M2 yhdistelmä tuotti keskimäärin 20 % leveämmän tukimuurin kuin DA2*. Nykyisistä mitoitustavoista selvästi poikkeava (c) VC1+M2 tuotti keskimäärin 16 % leveämmän anturan ja 34 % leveämmän tukimuurin kuin DA2*. DA2:ta lähes vastaava uusi mitoitustapa (d) VC1+RFA tuotti keskimäärin 8 % leveämmän anturan ja 4 % leveämmän tukimuurin kuin mitoitustapa DA2*. DA2*:ä lähes vastaava uusi mitoitustapa (e) VC4+RFA tuotti keskimäärin 3 % leveämmän anturan kuin DA2*, mutta kuorman vinoutta rajaavan erityisehtonsa takia keskimäärin 64 % leveämmän tukimuurin kuin DA2*. Tämä erityisehto, jonka mukaan vaakakuorma saa olla korkeintaan 20 % pystykuormasta, rajoittaa numeerisilla laskentamenetelmillä tärkeän mitoitustavan (e) VC4+RFA käyttöä.

Nosturin tukijalan mitoituksessa uudet mitoitustavat paitsi (c) VC1+M2 olivat keskimäärin 9– 11 % edullisempia kuin DA2 ja DA2*. Uusi EQU-mitoitustapa VC2 poikkeaa selvästi nykyisestä EQU-mitoitustavasta. VC2 tuotti 5 % kapeamman neliöanturan ja 5–15 % kapeamman tukimuurin kuin nykyinen EQU-mitoitustapa riippuen maan lujuuteen kohdistetusta varmuudesta, jota uudet eurokoodit eivät määritä.

Avainsanat: EN 1997, toinen sukupolvi, mitoitustapa, murtorajatilamitoitus, kantokestävyys, kaatuminen, anturaperustus, tukimuuri

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Riku-Matti Kurki: Geotechnical ultimate limit state design of shallow foundations according to the new Eurocode 7

Master's Thesis Tampere University Civil Engineering January 2024

Eurocodes, i.e., European design standards for load-bearing structures are applied to shallow foundations in Finland. The 2nd generation of Eurocodes is estimated to be implemented between 2025 and 2028. The new Eurocodes EN 1990 and EN 1997 will affect the design methods, the partial factors and the design guidelines and conditions of spread foundations and gravity walls.

This thesis studies how the new design methods affect the ultimate limit state (ULS) design of spread foundations and gravity walls both on soil and on rock and their dimensions compared to the current design approaches. In addition, a punching failure of a crane outrigger on coarsegrained fill, with fine-grained soil underneath, is similarly studied. The results are intended to help the Finnish Transport Infrastructure Agency and the Finnish Ministry of the Environment to make national choices for the new Eurocodes about design approaches and partial factor values.

The minimum width of a square footing and a continuous cantilever gravity wall on soil were calculated in the ULS of bearing and sliding resistance (GEO) under different ground conditions and with different loads. The minimum width of a square footing and a cantilever gravity wall on rock were calculated in the ULS of static equilibrium (EQU) and sliding resistance under different ground conditions and with different loads. For the crane outrigger the maximum load with different fill layer thicknesses and outrigger pad sizes were calculated in the ULS of bearing resistance (GEO). Bearing resistance and sliding resistance were calculated with the current Eurocode 7 design approaches DA2 and DA2* and with the new Eurocode 7 design methods, the combinations of the load partial factor sets VC1, VC3 and VC4 and the partial factors of ground properties (MFA) or resistance (RFA). The static equilibrium was calculated using the current Eurocode 7 EQU design method and the new Eurocode 7 EQU design method VC2. The results of the design methods were compared to each other.

In the calculations, the various conditions required by the Eurocodes and national annexes were checked. For the serviceability limit states (SLS) only the eccentricity of the loads was checked. The study does not include a calculation of ultimate limit states concerning internal failure of structural elements (STR), the overall stability, loss of equilibrium due uplift (UPL) or hydraulic failure (HYD). The calculations were done using analytical methods.

The new GEO-ULS design methods for spread foundations are almost the same as for retaining structures. DA2 always produced a width greater than or equal to DA2*. The combination of (*a*) VC1+M1 and (*b*) VC3+M2 corresponding to the current DA1 produced on average 7% wider square footing than DA2*. The combination of (*a*) VC1+M1 and (*b*) VC3+M2 produced on average 20% wider gravity wall than DA2*. The method (*c*) VC1+M2, not corresponding to any current Eurocode design method, produced on average 16% wider footing and 34% wider wall than DA2*. The method (*d*) VC1+RFA, almost equivalent to DA2, produced on average 8% wider footing and 4% wider wall than DA2*. The method (e) VC4+RFA, almost equivalent to DA2*, produced on average 3% wider square footing than DA2*, but due to its special condition limiting the load inclination, an average 64% wider gravity wall than DA2*. This special condition, according to which the horizontal load may be no more than 20% of the vertical load, limits the important use of (*e*) VC4+RFA with numerical calculation methods.

For the crane outrigger design, the new design methods except (c) VC1+M2 were on average 9–11% more affordable than DA2 and DA2*. The new EQU design method VC2 clearly differs from the current EQU method. VC2 produced 5% narrower square footing and 5–15% narrower gravity wall than the current EQU method, depending on the partial factor applied to the soil strength, which is not specified by the new Eurocodes.

Keywords: EN 1997, second generation, design approach, ultimate limit state design, bearing capacity, toppling, spread foundation, gravity wall

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on diplomi-insinööritutkintoni viimeinen osa. Se on laadittu pääosin vuoden 2023 aikana. Työ on Väyläviraston tilaus työnantajaltani Ramboll Finland Oy:ltä. Kiitän diplomityöni ohjauksesta ja kommenteista Panu Tollaa Väylävirastosta, ohjaajiani Mika Knuutia ja Tim Länsivaaraa Tampereen yliopistosta ja erityisesti ohjaajaani Ville Lehtosta Rambollista. Kiitän myös työnantajaani Ramboll Finland Oy:tä ja esimiestäni Pietari Kousaa diplomityön alullepanosta ja materiaalisista edellytyksistä työlle.

Lisäksi kiitän puolisoani Helenaa ja hänen perhettään diplomityön ja muiden opintojeni tukemisesta, erityisesti diplomityötilan ja muiden puitteiden tarjoamisesta sekä henkisestä tuesta. Kiitän myös opiskelutovereitani ja muita ystäviäni vertaistuesta.

Lopuksi esitän suurimmat kiitokset äidilleni, isälleni ja sisaruksilleni korvaamattomasta ja järkkymättömästä tuesta ja avusta opintojeni läpi.

Tampereella, 8.4.2024

Riku-Matti Kurki

SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDAN	ТО	1
2.EUROKC	ODIEN MURTORAJATILAMITOITUS ANTURAPERUSTUKSILLA	JA
TUKIMUUF	REILLA	4
2.1	Eurokoodeista lyhyesti	4
2.2	Eurokoodi 7:n murtorajatilat	5
2.3	Nykyiset GEO-mitoitustavat	7
2.4	Uudet GEO-mitoitustavat	15
2.5	EQU-mitoitustavat	22
3.KANTOK	ESTÄVYYS	26
3.1	Prandtlin teoria	26
3.2	Terzaghin yleinen kantokestävyysyhtälö	28
3.3	Kantokestävyysyhtälön oletukset, rajoitukset ja korjaukset	30
3.4	Eurokoodi 7:n kantokestävyysyhtälö avoimessa tilassa	37
3.5	Eurokoodi 7:n kantokestävyysyhtälö suljetussa tilassa	38
3.6	Lävistysmurto	39
3.7	Kulmatukimuurin kantokestävyys ja maanpaine	45
4.VERTAIL	ULASKELMAT	48
4.1	Laskentatapauksissa tehdyt valinnat ja oletukset	48
4.2	Neliöantura maanvaraisesti (GEO)	51
4.3	Kulmatukimuuri maanvaraisesti (GEO)	61
4.4	Nosturin tukijalka maanvaraisesti (GEO)	81
4.5	Neliöantura kalliolla (EQU)	85
4.6	Kulmatukimuuri kalliolla (EQU)	88
5.VERTAIL	ULASKELMIEN TULOKSET	93
5.1	Neliöantura maanvaraisesti (GEO)	94
5.2	Kulmatukimuuri maanvaraisesti (GEO)	109
5.3	Nosturin tukijalka maanvaraisesti (GEO)	138
5.4	Neliöantura kalliolla (EQU)	148
5.5	Kulmatukimuuri kalliolla (EQU)	150
6.YHTEEN	VETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	155
6.1	GEO-murtorajatilan mitoitustavat	155
6.2	GEO-murtorajatilan laskentatapauksien tulokset	157
6.3	EQU-murtorajatilan mitoitustavat ja laskentatapauksien tulokset	163
LÄHTEET		166

LIITE A: MAANVARAISEN NELIÖANTURAN LASKENTATAPAUKSIEN YKSITYISKOHTAISET TULOKSET LIITE B: MAANVARAISEN KULMATUKIMUURIN LASKENTATAPAUKSIEN YKSITYISKOHTAISET TULOKSET

KUVALUETTELO

<i>Kuva 2.1.</i> Massiivinen tukimuuri vasemmalla ja kulmatukimuuri oikealla. (Briaud	7
2013, S. 727)	/
Kuva 2.2. Maanvaraisen perustuksen epakeskisyyttä rajoittavat ellipsi ja	
sydänkuvio mitoitustavalla DA2*. (NCCI 7 2023, s. 48)	14
Kuva 3.1. Prandtlin teorian mukainen liukupinta kantokestävyyden ylittyessä.	
(RIL 157-2 1990, s. 70)	26
Kuva 3.2. Kolme erilaista maan murtopintaa (failure surface) ja kuorman	
(load/unit area) suhde painumaan (settlement). (Das 2011, s. 134)	28
Kuva 3.3. Perustamistason alapuolisen maan painoon v aiheuttaman	
kantokestävvyden ellipsimurtopinta ja kolmiojakauma. (Caquot &	
Kerisel 1966 Van Baarsin 2018 s. 33 mukaan)	30
Kuva 3.4. Perustamistason alanuolisen maan nainoon vaiheuttaman	
kantokestävvyden elementtimenetelmällä inhdettu	
hyperbelijakauma (Van Baarsin 2018 s. 34)	30
Nyperbelijakadina. (Van Daarsin 2010, S. 54)	50
Ruva 3.5 . Felusiuksen ponjan milat A, B, L, B, L, B ja e_L navammonistelluna.	20
(PIEN 1997-3 2022, S. 04)	32
Kuva 3.6. Kaitevuus β_1 , kun perustamistason syvyys D mitataan perustuksen	~~
reunasta. (NCCI 7 2023, S. 47)	36
Kuva 3.7. Kaltevuus β_2 , kun perustamistason syvyys on D = 0. (NCCI 7 2023, s.	
47)	36
Kuva 3.8. Kaksi erilaista murtomekanismia kerroksellisessa maassa. Perustuu	
lähteeseen (Das 2011, s. 191)	41
Kuva 3.9. Nomogrammi lävistysleikkauskertoimen K_{ps} (kuvassa K_s)	
määrittämiseen kantokestävyyssuhteen q₂/q₁ ja tehokkaan maan	
sisäisen kitkakulman φ' perusteella (Meyerhof & Hanna 1978, s.	
566)	42
Kuva 3.10. Murtovvöhvkkeen svvvvttä z₂ havainnollistava kuva. (prEN 1997-3	
2022, s. 272)	. 45
Kuva 3.11 . Nomogrammi murtovvöhykkeen syvyyden z _e määrittämiseen	
horisontaali- ja vertikaalikuormien suhteen H/V ja tehokkaan maan	
sisäisen kitkakulman ominaisanvon (o', in perusteella (prEN 1997-3	
$2022 \approx 272$	15
Kuva 3 12 Periaatekuva kulmatukimuurin murtoninta ja kuormat (nerustuu	+0
lähtoisiin Knonnett & Craig 2020 p. 479 in Dill. 157 2 1000 p. 70)	16
Ianteisiin Knappell & Oldig 2020, S. 476 ja RiL 157-2 1990, S. 70)	40 54
Kuva 4.1. Maanvaraisen neliäenturen leekenteteneukeet luiveese tiiviises	94
Kuva 4.2. Maanvaraisen neiloanturan laskentatapaukset kulvassa tiiviissa	50
moreenissa suurella ja plenella vaakakuormalla.	59
Kuva 4.3. Maanvaraisen nelioanturan laskentatapaukset kuivassa loyhassa	
hiekassa suurella ja pienellä vaakakuormalla	60
Kuva 4.4. Maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukset kuivassa	
mursketäytössä siltin päällä suurella ja pienellä vaakakuormalla	61
Kuva 4.5. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentageometria ja kuormat.	
Liikenne- kuormien q1, q2 ja q3 ominaisarvot eri kuormatapauksissa	
on esitetty taulukossa 4.4	65
Kuva 4.6. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset tiiviissä kuivassa	
moreenissa	76
Kuva 4.7. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset lövhässä kuivassa	2
hiekassa	. 77
Kuva 4.8 Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatanaukset kuivassa	
mursketävtössä märän siltin näällä	78
Kuva A 0 Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatanaukset vedellä	
kullästynpessä tiiviissä morponisso	70
kyllastyrieessa lliviissa moreenissa	/9

Kuva 4.10. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset vedellä	
kyllästyneessä löyhässä hiekassa	. 80
Kuva 4.11. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset vedellä	
kvllästvneessä mursketävtössä siltin päällä	. 81
Kuva 4.12. Maanvaraisen nosturin tukijalan laskentageometria, kun tukijalan	-
pohia on 1.0 m x 1.0 m ia täyttökerroksen paksuus on $D_1 = 1.0$ m	. 83
Kuva 4.13 Maanvaraisen nosturin tukijalan laskentageometria, kun tukijalan	
nobia on 2.0 m x 2.0 m ja täyttökerroksen naksuus on $D_4 = 2.0$ m	83
Kuva 4 14 Maanvaraisen nosturin tukijalan laskentageometria, kun tukijalan	. 00
nobia on 1.0 m v 1.0 m ia täyttökerroksen naksuus on $D_{c} = 2.0$ m	81
$F_{\mu\nu\sigma}$ 4.15 Kallianvaraisan paliöanturan laskantagaametria ja kuarmat	.07
Kuva 4.15. Kalilonvaraisen kulmatukimuurin laskentagaamatris is kuarmat	. 07
Kuva 4.10 . Kalilonvalaisen kuimalukimuunin laskenlageometra ja kuomal.	
Linkenne- kuormien q_1 , q_2 ja q_3 ominaisarvoi en kuormatapauksissa	00
on esitetty taulukossa 4.4.	. 90
Kuva 5.1. Maanvaraisen nelioanturan mitoitusleveys B kuivassa tiiviissa	
moreenissa. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman	
$T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40). 'Mitoitustavoista (a) ja (b)	
epäedullisempi on määräävä	. 97
Kuva 5.2. Maanvaraisen neliöanturan mitoitusleveys B kuivassa löyhässä	
hiekassa. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman	
"T _{rep} /N _{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹ Mitoitustavoista (a) ja (b)	
epäedullisempi on määräävä	100
Kuva 5.3. Maanvaraisen neliöanturan mitoitusleveys B kuivassa mursketäytössä	
siltin päällä. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman	
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0.2$ "-ehtoa (2.40). ¹ Mitoitustavoista (a) ja (b)	
epäedullisempi on määräävä.	103
Kuva 5.4. Anturalevevden B kaikkien laskentatapauksien keskimääräinen	
suhteellinen ero v eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan	
DA2*. VC4+RFA* on mitoitusvhdistelmä VC4+RFA ilman " T_{ren}/N_{ren}	
≤ 0.2 "-ehtoa (2.40) ¹ Mitoitustavoista (a) ia (b) epäedullisempi on	
määräävä	108
Kuva 5.5. Maanvaraisen kulmatukimuurin mitoituslevevs R kuivassa tiiviissä	,
moreenissa VC4+REA* on mitoitusvhdistelmä VC4+REA ilman	
$T_{m}/N_{m} < 0.2^{n}-ehtor (2.40)^{-1}Mitoitustavoista (a) ia (b)$	
enäedullisemni on määräävä	112
Kuva 5.6. Maanvaraisen kulmatukimuurin miteitusleveve B. kuivassa läyhässä	112
higkassa VCA+DEA* on mitoitusyhdistalmä VCA+DEA ilman	
$\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}$	
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ -eritoa (2.40). "Mitoitustavoista (a) ja (b)	116
epaedullisempi on maaraava.	110
Kuva 5.7 . Maanvaraisen kuimatukimuurin mitoitusieveys B kuivassa	
mursketaytossa siitin paalla. VC4+RFA" on mitoltusyndisteima	
VC4+RFA IIman " $I_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-entoa (2.40). 'Mitoitustavoista (a)	
ja (b) epaedullisempi on maaraava.	119
Kuva 5.8. Maanvaraisen kulmatukimuurin mitoitusleveys B vedella	
kyllästyneessä tiiviissä moreenissa. VC4+RFA* on	
mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T _{rep} /N _{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).	
'Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä	123
Kuva 5.9. Maanvaraisen kulmatukimuurin mitoitusleveys B vedellä	
kyllästyneessä löyhässä hiekassa. VC4+RFA* on	
mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T _{rep} /N _{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).	
¹ Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä	127
Kuva 5.10. Maanvaraisen kulmatukimuurin mitoitusleveys B vedellä	
kyllästyneessä mursketäytössä siltin päällä. VC4+RFA* on	
mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T _{rep} /N _{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).	
¹ Mitoitustavoista (a) ia (b) epäedullisempi on määräävä	130

Kuva 5.11 . Tukimuurileveyden B kaikkien laskentatapauksien keskimääräinen suhteellinen ero v eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2* VC4+REA* on mitoitusvhdistelmä VC4+REA ilman "T. /N
$\leq 0,2$ "-ehtoa (2.40). ¹ Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on
määräävä136
Kuva 5.12. Tukimuurileveyden B vertailu nykyisen mitoitustavan DA2* ja
oletetusti käyttökelpoisimpien uusien mitoitustapojen välillä
rautatieliikennekuorman tapauksissa. VC4+RFA* on
mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40).
Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä
Kuva 5.13 . Nosturin tukijalan maksimipystykuorma $Q_{V,k}$ kandella eri lujuuden
savella, $c_{u,k} = 10$ kPa ja $c_{u,k} = 20$ kPa. Pleni tukijalan ponja (1,0 m x
1,0 m) ja pieni täyllökerrökseri paksuus ($D_1 = 1,0$ m). 1Mitoitustovoisto (a) ia (b) anäadullisampi on määräävä
$K_{IIVa} 5 14$ Nosturin tukijalan maksiminystykuorma Ω_{VV} kahdella eri lujuuden
Kuva 0.14 : Nostann takijalan maksimipystykuolinia $Q_{V,k}$ kandena en lajuuden savella, $c_{uk} = 10 \text{ kPa}$ ia $c_{uk} = 20 \text{ kPa}$. Suuri tukijalan pohja (2.0 m
x 2 0 m) ia suuri täyttökerroksen paksuus (D ₁ = 2 0 m)
¹ Mitoitustavoista (a) ia (b) epäedullisempi on määräävä
Kuva 5.15 . Nosturin tukijalan maksimipystykuorma Q_{Vk} kahdella eri lujuuden
savella, $c_{u,k} = 10 \text{ kPa}$ ja $c_{u,k} = 20 \text{ kPa}$. Pieni tukijalan pohja (1,0 m x
1,0 m) ja pieni täyttökerroksen paksuus (D₁ = 2,0 m).
¹ Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä
Kuva 5.16 . Maksimipystykuorman $Q_{V,k}$ kaikkien laskentatapauksien
keskimääräinen suhteellinen ero v eri mitoitustavoilla verrattuna
mitoitustapaan DA2*. 'Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on
määräävä
Kuva 5.17 . Kallionvaraisen nelioanturan mitoitusleveys B Suomen nykyisella
EQU-mitoitustavalla ja uudella EQU-mitoitustavalla VC2.
Liukunniskeslavyys lärkislellu nykyisenä miloiluslavana DA2 lai uudollo mitoitustovollo VC4+DE4
Kuva 5 18 Kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentatanauksen mitoituslevevs B
Suomen nykvisellä EQU-mitoitustavalla mallikertoimella (mk) v_{MK} =
1 20 ja ilman mallikerrointa sekä uudella EQU-mitoitustavalla VC2
maan luiuuden osavarmuuslukusarioilla M1 ja M2.
Liukumiskestävvvs tarkistettu nykvisellä mitoitustavalla DA2* tai
uudella mitoitustavalla VC4+RFA152
Kuva 6.1. Maanvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin leveyden B sekä
nosturin tukijalan maksimipystykuorman Q _{V,k} kaikkien
laskentatapauksien keskimääräinen suhteellinen ero eri
mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2*. VC4+RFA* on
mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T _{rep} /N _{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).
'Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DA1, DA2	EN 1997-1:2004/A1:2013 määrittelemät mitoitustavat (DA = de-							
DA2*, DA3	sign approach) osavarmuuden kohdentamiselle kuormiin, kuormien							
	vaikutuksiin, maan lujuusparametreihin ja maankestävyyteen							
EQU	rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen jäykkänä							
	kappaleena							
GEO	rakennuspohian murtuminen tai liian suuri muodonmuutos							
HYD	hydraulisista gradienteista aiheutuva hydraulinen maapohian nousu							
	nutkieroosio (engl. nining) tai sisäinen eroosio							
	material factor approach Julisien eurokoodien mitoitustana, missä							
	osavarmuutta kohdistetaan maan lujuusnarametrejhin							
1 \/\/	Suomon Liikonno, ja viostintäministoriä							
	National Annay, kanaallinan liita ayrakaadiin							
	National Annex, Kansallinen lille eurokoodiin							
	Nationally Determined Parameter, kansallisesti valittava parametri							
RFA	resistance factor approach, uusien eurokoodien mitoitustapa, missa							
	osavarmuutta kohdistetaan maan kestavyyteen							
SLS	serviceability limit state, käyttörajatila							
STR	rakenteen tai sen osien sisäinen murtuminen tai liian suuri muodon-							
	muutos							
ULS	ultimate limit state, murtorajatila							
UPL	rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen vedenpai-							
	neesta aiheutuvan nosteen tai muiden pystysuuntaisten kuormien							
	takia							
YM	Suomen Ympäristöministeriö							
VC1. VC2.	EN 1990:2023 määrittelemät murtoraiatilamitoituksessa käytettävät							
VC3, VC4	tavat (VC = verification case) osavarmuuden kohdentamiselle kuor-							
,	miin tai kuormien vaikutuksiin							
Vmax	laskenta, jossa nystykuormia tarkastellaan enäedullisina							
Vmin	laskenta, jossa pystykuormia tarkastellaan edullisina							
VIIIII	laskenta, jossa pystykäönniä tärkästellään edullisina							
Δ	perustuksen pohian pinta-ala [m²]							
Δ'	perustuksen pohjan tehokas ninta-ala [m²]							
Α	perustuksen pohjan tenokas pinta-ala [m]							
A red								
D	osuus [III] norustuksen nehien leveva [m]							
D	perustuksen polijari leveys [iii]							
DDA2*	perusiuksen ponjan leveys mitoliusiavalla DAZ [m]							
В	tenokas perustuksen ponjan leveys [m]							
Ca	adneesiovolma [kiv/m]							
D	perustamistason syvyys maanpinnasta [m]							
D_1	ylimmän maakerroksen paksuus perustuksen alla [m]							
D_w	pohjavedenpinnan syvyys maanpinnasta [m]							
Ed	kuormien vaikutusten mitoitusarvo							
E _{dst,d}	kaatavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo							
E _{stb,d}	vakauttavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo							
F _d	kuorman mitoitusarvo							
F_k	kuorman ominaisarvo							
F _{rep}	kuorman edustava arvo							
G _{d,i}	pysyvän kuorman <i>j</i> mitoitusarvo							
G _{k,i}	pysyvän kuorman į ominaisarvo							
Gkisup	epäedullisen pysyvän kuorman <i>i</i> ominaisarvo							
Gk i inf	edullisen pysyvän kuorman <i>i</i> ominaisarvo							
- ĸ,j,""	nyevyä ominaisnyetykuorma							
GVk								

H _d	vaakasuoraan perustuksen pohjaan kohdistuva mitoituskuorma						
H _{muuri}	kulmatukimuurin korkeus [m]						
K _{FI}	luotettavuusluokasta riippuva kuormakerroin						
K _{pH}	passiivipainekertoimen vaakakomponentti						
K _{ns}	lävistysleikkauskerroin						
Ĺ	perustuksen pohian pituus [m]						
_, ,	tehokas perustuksen pohian pituus [m]						
 N/	kohtisuoraan perustuksen tai tukimuurin pohiaan kohdistuva						
/ •	recultanttivoima [kN: kN/m]						
NL.	N:n ominaisanyo [kN]: kN/m]						
N N	N:n odustava anvo [kN: kN/m]						
Nrep	N:n mitoitucenyo [kN: kN/m]						
Nd N	kentevuuskerrein keheesien veikutukeelle						
IN _{CU}	kahlavuuskenoin sujelussa liiassa						
NG,d,fav	kontisuoraan perustuksen tai tukimuurin ponjaan kondistuva						
•	pysyvan voiman mitoitusarvo, edullinen [kN; kN/m]						
N _{G,rep,fav}	kohtisuoraan perustuksen tai tukimuurin pohjaan kohdistuva						
	pysyvän voiman edustava arvo, edullinen [kN; kN/m]						
N _q	kantavuuskerroin perustamistaso yläpuolisen kuorman vaikutuk-						
	selle						
N _{q1}	ylemmän maakerroksen <i>N</i> ª kerroksellisessa maassa						
N _v	kantavuuskerroin perustamistason alapuolisen maan painon vaiku-						
	tukselle						
N_{v1}	ylemmän maakerroksen $N_{ m v}$ kerroksellisessa maassa						
ODF	vlimitoituskerroin eli kestävvyden ja kuormien vaikutusten suhde						
ODFFOU	staattisen tasapainon vlimitoituskerroin						
ODFKK	kantokestävyyden ylimitoituskerroin						
ODF	liukumiskestävvvden vlimitoituskerroin						
P	esijännitysvoiman edustava arvo [kN: kN/m]						
P	nassiivimaannaineen resultanttivoima [kN: kN/m]						
P _o	lenonaine aibeuttama resultantti [kN: kN/m]						
P.	P.:n omingison/o [kN: kN/m]						
P., .	$P_{\rm c}$:n mitoitusarvo [kN; kN/m]						
D	P., voin pycywillä kuormilla laskottuna [kN: kN/m]						
Г 0,G,k D	$P_{0,k}$ valit pysyvilla kuominia laskettuna [kN, N/m]						
F 0, Q, k	$\Gamma_{0,k}$ valit muuluviila kuomina laskellutta [kiv, kiv/m]						
$\mathbf{Q}_{d,j}$							
$\mathbf{Q}_{H,k}$							
$Q_{k,1}$	maaraavan muuttuvan kuorman ominaisarvo						
$Q_{k,i}$	muuttuvan kuorman i ominaisarvo						
$\mathbf{Q}_{V,k}$	muuttuva ominaispystykuorma						
R_d	kestavyyden mitoitusarvo [kN; kN/m]						
R_k	kestävyyden ominaisarvo [kN; kN/m]						
R EQU,d	EQU-murtorajatilan mitoitusleikkauskestävyys [kN; kN/m]						
R_N	kantokestävyyden resultanttivoima avoimessa tilassa [kN; kN/m]						
R _{Nd}	<i>R</i> _N :n mitoitusarvo [kN; kN/m]						
R _{Nk}	<i>R_N</i> :n ominaisarvo [kN; kN/m]						
R _{Nu}	kantokestävyyden resultanttivoima suljetussa tilassa [kN; kN/m]						
R _{Nt}	ylemmän kerroksen kantokestävyyden q_t resultanttivoima [kN;						
	kN/m]						
R _{N,pk}	kantokestävyyden resultanttivoima painotetulla keskiarvolla [kN;						
	kN/m]						
R _{p,d} , R _{Td,face}	liukumista vastustava maanpaineen resultantti perustuksen tai tuki-						
	muurin sivulla [kN; kN/m]						
R _{Td}	liukumiskestävyyden mitoitusarvo avoimessa tilassa [kN: kN/m]						
R _{Tud}	liukumiskestävyyden mitoitusarvo sulietussa tilassa [kN: kN/m]						

Т	tangentiaalisesti perustuksen pohjaan kohdistuva resultanttivoima [kN: kN/m]
Τĸ	T:n ominaisarvo [kN: kN/m]
Tren	<i>T</i> :n edustava arvo [kN: kN/m]
Td	T:n mitoitusarvo [kN: kN/m]
Ŭ	perustuksen tai tukimuurin pohiaan kohtisuorasti kohdistuva noste
•	[kN; kN/m]
U _{rep}	<i>U</i> :n edustava arvo [kN; kN/m]
Ud	<i>U</i> :n mitoitusarvo [kN; kN/m]
V _d	kohtisuoraan perustuksen tai tukimuurin pohjaan kohdistuva voiman
	mitoitusarvo [kN; kN/m]
V'	tehokas kohtisuoraan perustuksen tai tukimuurin pohjaan
	kohdistuva voima
V' _d	V':n mitoitusarvo
V'_k	V':n ominaisarvo
W	perustuksen tai kulmatukimuurin paino täyttöineen [kN; kN/m]
W _{antura}	anturan paino [kN]
W _{pilari}	pilarin paino maanpintaan asti [kN]
W _{täyttö}	anturan yläpuolisen [kN]
W _{muuri}	kulmatukimuurin pystymuurin paino [kN/m]
$W_{ m pohja}$	kulmatukimuurin pohjalaatan paino [kN/m]
W _{taustatäyttö}	kulmatukimuurin taustatäytön paino [kN/m]
X_k	maan lujuusparametrin ominaisarvo
X_{Rd}, X_d	maan lujuusparametrin mitoitusarvo
X _{rep}	maan lujuusparametrin edustava arvo
b	neliöanturan pilarin paksuus [m]
bc	pohjakaltevuuskerroin koheesion vaikutukselle
b _{cu}	pohjakaltevuuskerroin suljetussa tilassa
b _q	pohjakaltevuukerroin perustamistaso yläpuolisen kuorman vaikutuk-
,	selle
b_{ν}	pohjakaltevuuskerroin perustamistason alapuolisen maan painon
·	vaikutukselle
С	koheesio [kPa]
C'	tehokas koheesio [kPa]
C'a	adheesio [kPa]
Cu, Su	suljettu leikkauslujuus [kPa]
C _{u,d}	<i>c</i> _u :n mitoitusarvo [kPa]
C _{<i>u</i>,<i>k</i>}	<i>c</i> _u :n ominaisarvo [kPa]
C _{u,rep}	<i>c</i> _u :n edustava arvo [kPa]
C _{u2}	alemman kerroksen <i>c</i> _u kerroksellisessa maassa [kPa]
d	anturan paksuus [m]
d _c	syvyyskerroin koheesion vaikutukselle
d _{cu}	syvyyskerroin suljetussa tilassa
d_q	syvyyskerroin perustamistaso yläpuolisen kuorman vaikutukselle
d_{γ}	syvyyskerroin perustamistason alapuolisen maan painon vaikutuk- selle
e _B	kuormien resultanttivoiman epäkeskisyys leveyden B suunnassa [m]
e _{B,d}	<i>e</i> _B kuormien mitoitusarvoilla laskettaessa
e _{B,G,k}	<i>e</i> _B pysyvien kuormien ominaisarvoilla laskettaessa
e _{B,k}	<i>e</i> _B kuormien ominaisarvoilla laskettaessa
e	kuormien resultanttivoiman epäkeskisyys pituuden <i>L</i> suunnassa [m]
g	maanpinnan kaltevuuskerroin NCCI 7:n mukaan
g _c	maanpinnan kaltevuuskerroin koheesion vaikutukselle

g _{cu}	maanpinnan kaltevuuskerroin suljetussa tilassa
g_q	maanpinnan kaltevuuskerroin perustamistaso yläpuolisen kuorman vaikutukselle
\mathcal{G}_{Y}	maanpinnan kaltevuuskerroin perustamistason alapuolisen maan
h	vaakakuorman etäisvys maanninnasta
i.	kuormakaltevuuskerroin koheesion vaikutukselle
i.	kuormakaltevuuskerroin sulietussa tilassa
i.	kuormakaltevuuskerroin perustamistaso vläpuolisen kuorman vai-
14	kutukselle
İγ	kuormakaltevuuskerroin perustamistason alapuolisen maan painon vaikutukselle
k _F	seuraamusluokasta riippuva seuraamuskerroin
$k_{ ext{tan}\delta}$	vähennyskerroin rakenteen ja maan välinen kitkakertoimen tan δ:n laskemiseksi
Kcu	vähennyskerroin R_{Tud} :n laskemiseksi
m	eksponentti kuormakaltevuuskertoimien kaavoissa
a	perustamistason vläpuolinen kuorma [kPa]
a'	perustamistason vläpuolisen maan tehokas kuorma [kPa]
q ₁	kantokestävyys ylemmän maakerroksen pinnalla ilman alempaa
1	maakerrosta [kPa]
q_2	kantokestävyys alemman maakerroksen pinnalla ilman ylempää
<i>i</i> -	maakerrosta [kPa]
q_b	alemman maakerroksessa kantokestävyys [kPa]
q _u	kantokestävyys [kPa]
q_t	ylemmän maakerroksen kantokestävyys [kPa]
r ₀ , r ₁	Prandtlin teorian liukupinnan logaritmisen spiraalin säteet [m]
S	kulmatukimuurin seinän ja pohjan paksuus [m]
Sc	muotokerroin koheesion vaikutukselle
S _{cu}	muotokerroin suljetussa tilassa
Sq	muotokerroin perustamistaso yläpuolisen kuorman vaikutukselle
S _{q1}	ylemmän maakerroksen <i>s</i> _q kerroksellisessa maassa
S_{γ}	muotokerroin perustamistason alapuolisen maan painon vaikutuk-
Sut	vlemmän maakerroksen s, kerroksellisessa maassa
Up	huokosvedennaine perustamistasossa [kPa]
Uok	un ominaisarvo [kPa]
U2,A	un mitoitusarvo [kPa]
\bar{v}_{j}	mitoitustavan <i>j</i> keskimääräinen suhteellinen ero mitoitustapaan
	DA2*
X	<i>N:n</i> vaakaetäisyys tukimuurin pohjan keskipisteestä [m]
X muuri	<i>W_{muuri}</i> :n vaakaetäisyys tukimuurin pohjan keskipisteestä [m]
X pohja	<i>W_{pohja}</i> :n vaakaetäisyys tukimuurin pohjan keskipisteestä [m]
X taustatäyttö	<i>W_{taustatäyttö}:</i> n vaakaetäisyys tukimuurin pohjan keskipisteestä [m]
У	T:n pystyetäisyys perustuksen tai tukimuurin pohjan keskipisteestä
	[m]
Ζ	syvyys maanpinnasta [m]
Ze	murtovyöhykkeen syvyys [m]
Z_W	pohjavedenpinnan syvyys perustamistasosta [m]
α	perustuksen pohjan kaltevuus [rad]
β	maanpinnan kaltevuus [rad]
β_1	maanpinnan kaltevuus 1. vaihtoehto NCCI 7:n mukaan [rad]
β ₂	maanpinnan kaltevuus 2. vaihtoehto NCCI 7:n mukaan [rad]
Y	maan tilavuuspaino [kN/m³]

xiii

Y'	tehokas maan tilavuuspaino [kN/m³]
V1	ylemmän maakerroksen tilavuuspaino [kN/m ³]
V'1	ylemmän maakerroksen tehokas tilavuuspaino [kN/m ³]
Yc'	tehokkaan koheesion osavarmuusluku
Vcu	suljetun leikkauslujuuden osavarmuusluku
VF	kuorman vaikutuksen osavarmuusluku
Y = YE,fav	edullisen kuorman vaikutuksen osavarmuusluku
VF	kuorman osavarmuusluku
VG, VG.sup	pysyvän epäedullisen kuorman osavarmuusluku
YG,fav, YG,inf	pysyvän edullisen kuorman osavarmuusluku
γ G,j	pysyvän kuorman <i>j</i> osavarmuusluku
Υм	maaparametrin osavarmuusluku
<i>Үмк</i>	NCCI 7:n mallikerroin kaataville pysyville kuormille EQU-rajatiloissa
Ϋ́Р	esijännitysvoiman osavarmuusluku
Yq	muuttuvan epäedullisen kuorman osavarmuusluku
Y Q,1	määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku
YQ,fav	muuttuvan edullisen kuorman osavarmuusluku
YQ,i	muuttuvan kuorman <i>i</i> osavarmuusluku
YQ,red	muuttuvan kuorman osavarmuusluku mitoitustavalla VC4
γr	kestävyyden osavarmuusluku
YRN, YR,v	kantokestävyyden osavarmuusluku
ΎRT, ÝR,h	liukumiskestävyyden osavarmuusluku
Ysat	täysin vedellä kyllästyneen maan tilavuuspaino [kN/m³]
γw	veden tilavuuspaino [9,81 kN/m³]
Yφ'	maan tehokkaan sisäisen kitkakulman osavarmuusluku
δ	rakenteen ja maan välinen kitkakulma [°]
δ'	<i>P</i> _p :n kulma vaakatasoon nähden [°]
θ	kulma <i>L'</i> :n ja <i>T</i> :n välillä [°]
ξ	epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin
σ_n	kokonaisnormaalijännitys [kPa]
σ'n	tehokas normaalijännitys [kPa]
σ'_v	maan tehokas pystyjännitys [kPa]
σ'_{v1}	maan tehokas pystyjännitys maanpinnan tasossa [kPa]
σ' _{v1,G}	maan tehokas pysyvä pystyjännitys maanpinnan tasossa [kPa]
$\sigma'_{v1,Q}$	maan tehokas muuttuva pystyjännitys maanpinnan tasossa [kPa]
σ'_{v2}	maan tehokas pystyjännitys perustamistasossa [kPa]
σ' _{v2,G}	maan tehokas pysyvä pystyjännitys perustamistasossa [kPa]
$\sigma'_{v2,Q}$	maan tehokas muuttuva pystyjännitys perustamistasossa [kPa]
Tf	leikkauslujuus [kPa]
arphi	maan sisäinen kitkakulma [°]
$oldsymbol{arphi}'$	tehokas maan sisäinen kitkakulma [°]
$\boldsymbol{\varphi}'_k$	arphi':n ominaisarvo [°]
$oldsymbol{arphi}_{d}$	arphi':n mitoitusarvo [°]
$oldsymbol{arphi}_1$	ylemmän maakerroksen $arphi$ ' kerroksellisessa maassa [°]
Ψ	kuorman yhdistelykerroin
W 0,1	pääasiallisen muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$oldsymbol{\psi}_{0,i}$	muuttuvan kuorman <i>i</i> yhdistelykerroin

1. JOHDANTO

Suomessa noudatetaan eurokoodeja kansallisine liitteineen maanvaraisten perustusten suunnittelussa (EN 1990 2005, s. 12–22). Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden eurooppalaisia suunnittelustandardeja (Lastunen 2021). Nykyinen EN 1990 eurokoodi: *Rakenteiden suunnitteluperusteet* esittää periaatteet ja vaatimukset rakenteiden varmuudelle, käyttökelpoisuudelle ja säilyvyydelle. EN 1990 on suunnittelun perusta koko eurokoodisarjalle. EN 1997 eurokoodi 7: *Geotekninen suunnittelu* kattaa rakennusten ja maaja vesirakentamisen geoteknisen suunnittelun. (Bond & Harris 2008, s. 8–9)

Nykyinen eurokoodi 7:n osa 1: Yleiset säännöt eli EN 1997-1 esittää geoteknisen suunnittelun kuormat ja mitoitusohjeet ja osa 2: *Pohjatutkimus ja koestus* eli EN 1997-2 esittää ohjeet geoteknisten laboratorio- ja kenttäkokeiden suunnittelemiseen ja tulosten tulkintaan. EN 1997-1:n luku 2 *Geoteknisen suunnittelun perusteet* esittää muun muassa suunnitteluvaatimukset ja mitoitustilanteet kuormille, mitoitusarvoille ja murtorajatiloille geoteknisessä suunnittelussa. Erityisesti EN 1997-1:n luvussa 2.4.7 esitetään staattisen tasapainon osoittamisen mitoitustapa sekä mitoitustavat kestävyyden osoittamiseen rakenteen ja maapohjan rajatiloissa DA1, DA2 ja DA3. EN 1997-1:n luku 6 *Antura- ja laattaperustus* sisältää määräykset ja ohjeet antura- ja laattaperustuksien murtorajatilamitoitukselle. Lisäksi EN 1997-1:n luku 9 määrää kulmatukimuurin kantokestävyyden ja liukumisvarmuuden mitoituksen osalta käytettävän luvun 6 määräyksiä ja ohjeita. (EN 1997-1 2013, s. 7, 20–35, 59–63, 94, 101; EN 1997-2 2007, s. 13)

Eurokoodeista julkaistaan toinen sukupolvi vuosien 2022–2027 välillä (RTT ry). Toisen sukupolven eurokoodit arvioidaan otettavan käyttöön vuosina 2025–2028 (Lastunen 2021; Lastunen 2023). Eurokoodien EN 1990 ja EN 1997 toisen sukupolven muutokset suunnitteluperusteissa vaikuttavat maanvaraisten anturaperustusten ja kulmatukimuurien mitoitustapoihin, osavarmuuslukujen sekä mitoitusta koskeviin ohjeisiin ja reunaehtoihin.

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia, miten uudet mitoitustavat vaikuttavat maanvaraisten sekä kallionvaraisten anturaperustusten ja tukimuurien murtorajatilamitoitukseen ja näiden mittoihin verrattuna nykyisiin mitoitustapoihin. Lisäksi tutkitaan vastaavasti nosturin tukijalan lävistysmurtoa karkearakeisella täytöllä, jonka alla on pehmeää savea. Työ on osa laajempaa Väyläviraston ja Suomen ympäristöministeriön selvitystyötä toisen sukupolven eurokoodien käyttöön ottamiseksi. Tulosten on tarkoitus auttaa tehtäessä kansallisia valintoja mitoitustavoista ja osavarmuuslukujen arvoista.

Tutkimus tehdään laskemalla maanvaraiselle neliöanturalle ja jatkuvalle kulmatukimuurille minimileveys kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden murtorajatiloissa (GEO) eri pohjaolosuhteissa ja eri kuormilla. Kallionvaraiselle neliöanturalle ja kulmatukimuurille lasketaan riittävä leveys staattisen tasapainon (EQU) ja liukumiskestävyyden murtorajatiloissa eri kuormilla. Nosturin tukijalalle lasketaan kantokestävyyden murtorajatilassa (GEO) maksimikuorma eri täyttökerrospaksuuksilla ja tukijalan pohjan ko'oilla. Laskelmissa tarkistetaan erinäiset eurokoodien ja kansallisten liitteiden vaatimat reunaehdot. Käyttörajatiloista (SLS) tarkistetaan vain kuormien epäkeskisyys. Tutkimus ei sisällä laskentaa murtorajatiloista, jotka koskevat rakenteen tai rakenneosien sisäistä murtumista (STR), kokonaisvakavuutta, nosteen aiheuttamaa murtumista (UPL) tai hydraulista murtumista (HYD). Laskennat tehdään analyyttisillä menetelmillä.

Kantokestävyys ja liukumiskestävyys lasketaan nykyisillä eurokoodi 7:n mitoitustavoilla DA2 ja DA2* sekä uusilla eurokoodi 7:n mitoitustavoilla, jotka koostuvat kuormien osavarmuuslukusarjojen VC1, VC3 ja VC4 ja maan ominaisuuksien (MFA) tai kestävyyden (RFA) osavarmuuslukusarjojen yhdistelmistä. Staattinen tasapaino lasketaan nykyisen eurokoodi 7:n staattisen tasapainon rajatilan mitoitusmenettelyllä sekä uuden eurokoodi 7:n mitoitustavalla VC2. Nykyisillä mitoitustavoilla käytetään Suomen kansallisia osavarmuuslukujen arvoja ja kansallisesti valittuja kuormayhdistelmiä. Uusilla mitoitustavoilla käytetään uusien eurokoodien mukaisia oletusarvoja ja niitä kuormayhdistelmiä, jotka ovat lähellä nykyisin Suomessa käytettäviä kuormayhdistelmiä. Neliöanturan ja kulmatukimuurin laskentatapauksissa verrataan perustuksen ja tukimuurin pohjan minimileveyttä nykyisten ja uusien mitoitustapojen välillä. Nosturin tukijalan laskentatapauksissa verrataan maksimikuormaa nykyisten ja uusien mitoitustapojen välillä.

Tämä diplomityö koostuu kuudesta luvusta. Tutkimuksen toisessa luvussa esitetään eurokoodit lyhyesti, eurokoodi 7:n murtorajatilat ja nykyisten ja uusien eurokoodien mukaiset GEO- ja EQU-mitoitustavat. Mitoitustavat käsitellään yleisesti ja erityisesti antura- ja laattaperustuksien sekä tukimuurien osalta keskittyen kantokestävyyteen, liukumiskestävyyteen ja staattiseen tasapainoon. Tutkimuksen kolmannessa luvussa esitetään Prandtlin kantokestävyysteoria, Terzaghin kantokestävyysyhtälö, yhtälön rajoitukset ja korjaukset. Kolmannessa luvussa esitetään myös nykyisen ja uuden eurokoodi 7:n suosittelemat kantokestävyyytälöön ja Prandtlin teoriaan. Näitä laskentamenetelmiä käytetään tämän työn laskelmissa. Lisäksi alaluvussa 3.7 esitetään kulmatukimuurin kantokestävyyden ja maanpaineen laskeminen. Tutkimuksen neljännessä luvussa esitetään tutkimukseen valitut laskentatapaukset, tapauksien laskentageometriat ja käytetyt parametrit sekä kuormien ja kestävyyden laskenta. Tutkimuksen viidennessä luvussa esitetään laskentatapauksien tulokset. Tutkimuksen kuudennessa luvussa esitetään tutkimuksen yhteenveto, johtopäätökset ja jatkotutkimusten tarve. 2. EUROKOODIEN MURTORAJATILAMITOITUS ANTURAPERUSTUKSILLA JA TUKIMUU-REILLA

Eurokoodit perustuvat rajatilamitoitukseen. Rajatilamitoituksessa varmistetaan, etteivät olennaiset rajatilat ylity missään mitoitustilanteessa. Rajatiloja ovat murtorajatilat ja käyttörajatilat. Murtorajatilat tarkoittavat kaikkia ihmisten turvallisuuteen ja rakenteiden varmuuteen liittyviä rajatiloja sekä joissakin tilanteissa varastoitavan tavaran tai aineen suojaamiseen liittyviä rajatiloja. Näitä ovat esimerkiksi tasapainotilan tai stabiiliuden menettäminen, rakenteen liialliset muodonmuutokset tai murtuminen ja väsyminen. Käyttörajatilat tarkoittavat rakenteen normaalikäytön toimintaan, ihmisten mukavuuteen ja rakennuksen ulkonäköön liittyviä rajatiloja. Näitä ovat esimerkiksi painumat ja siirtymät. (Bond & Harris 2008, s. 29–30; EN 1990 2005, s. 52–55; EN 1997-1 2013, s. 63)

2.1 Eurokoodeista lyhyesti

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden eurooppalaisia suunnittelustandardeja (Lastunen 2021). Eurokoodien tarkoituksena on poistaa kaupankäynnin teknisiä esteitä ja yhdenmukaistaa teknisiä vaatimuksia Euroopan unionin (EU) ja Euroopan vapaakauppajärjestön (EFTA) jäsenvaltioissa. Standardit on laatinut Euroopan standardointikomitean (CEN) tekninen komitea CEN/TC 250 Euroopan unionin (EU) ja Euroopan vapaakauppajärjestön (EFTA) mandaateilla. (EN 1990 2005, s. 12–16)

Eurokoodit koostuvat nykyisin seuraavasta kymmenestä standardista:

- EN 1990 eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet
- EN 1991 eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat
- EN 1992 eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu
- EN 1993 eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu
- EN 1994 eurokoodi 4: Betoni-teräs liittorakenteiden suunnittelu
- EN 1995 eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu
- EN 1996 eurokoodi 6: Muurattujen rakenteiden suunnittelu
- EN 1997 eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu
- EN 1998 eurokoodi 8: Maanjäristysmitoitus

• EN 1999 eurokoodi 9: Alumiinirakenteiden suunnittelu

Eurokoodit vahvistetaan kansallisiksi standardeiksi, jotka sisältävät CENin julkaisemien eurokoodien tekstit täydellisinä. Eurokoodien käyttäminen vaatii kansallisia liitteitä (National Annex, NA). Kansalliset liitteet sisältävät kansallisia valintoja vain niistä parametreistä, jotka on eurokoodeissa sallittu kansallisesti valittaviksi. (EN 1990 2005, s. 8–16) Kansallisesti valittavia parametrejä (Nationally Determined Parameters, NDP) ovat

- arvot tai luokat eurokoodeissa esitetyistä vaihtoehdoista,
- arvot, joista eurokoodissa on annettu vain tunnus,
- maakohtaiset tiedot (mm. maantieteelliset ja ilmastolliset) ja
- käytettävät menettelyt eurokoodissa esitetyistä vaihtoehdoista.

Näiden parametrien lisäksi kansalliset liitteet voivat sisältää myös päätöksiä koskien opastavien liitteiden soveltamista sekä viitteitä eurokoodin kanssa ristiriidattomiin soveltamisohjeisiin (Non Contradictionary Complementary Information, NCCI). Suomessa kansallisina liitteitä ovat Suomen ympäristöministeriön (YM) ja Liikenne- ja viestintäministeriön (LVM) julkaisut. (Lastunen 2021; EN 1990 2005, s. 8–16) Ympäristöministeriön julkaisemat kansalliset liitteet koskevat rakennuksia (YM NA EN 1990 2016; YM NA EN 1997-1 2018) ja Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisemat kansalliset liitteet koskevat rakennuksia (YM NA EN 1990 2016; YM NA EN 1997-1 2018) ja Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisemat kansalliset liitteet teitä, ratoja ja siltoja (LVM NA EN 1990 2015; LVM NA EN 1997-1 2015). Eurokoodeista julkaistaan toinen sukupolvi vuosien 2022–2027 välillä (RTT ry). Uudet eurokoodit arvioidaan otettavan käyttöön vuosina 2025–2028 (Lastunen 2021; Lastunen 2023).

2.2 Eurokoodi 7:n murtorajatilat

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 29–30) mukaan on tarkistettava, että seuraavat murtorajatilat eivät ylity:

- EQU eli rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen, kun rakenne ja maapohja oletetaan jäykäksi kappaleeksi ja rakennemateriaalien ja maan lujuudet merkityksettömiksi kestävyyden kannalta
- STR eli rakenteen tai sen osien sisäinen murtuminen tai liian suuri muodonmuutos, kun rakennemateriaalien lujuus on merkittävä kestävyyden kannalta
- GEO eli rakennuspohjan (maa tai kallio) murtuminen tai liian suuri muodonmuutos, kun maan tai kallion lujuus on merkittävä kestävyyden kannalta
- UPL eli rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen vedenpaineesta aiheutuvan nosteen tai muiden pystysuuntaisten kuormien takia

- HYD eli hydraulisista gradienteista aiheutuva hydraulinen maapohjan nousu, sisäinen putkieroosio (engl. piping) tai sisäinen eroosio

Myös uuden eurokoodi 7:n luonnos (prEN 1997-1 2022, s. 58–64) vaatii yllä olevien murtorajatilojen tarkistamisen sekä lisäksi aikariippuvaisten vaikutusten (mm. rapautuminen, eroosio ja kemiallisen koostumuksen muutos) ja syklisten kuormien aiheuttamien murtumisten tarkistamisen.

2.2.1 Murtorajatilat antura- ja laattaperustuksille

Antura- ja laattaperustuksien tehtävänä on välittää perustukseen kohdistuvat voimat maahan pohjansa kautta (prEN 1997-3 2022, s. 17). Nykyisen eurokoodi 7:n ensimmäisen osan luvussa 6 (EN 1997-1 2013, s. 59) ja uuden eurokoodi 7:n luonnoksen kolmannen osan luvussa 5 (prEN 1997-3 2022, s. 63–66) antura- ja laattaperustuksiin luetaan antura-, nauha- ja yhtenäiset laattaperustukset.

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 29, 59) mukaan antura- ja laattaperustuksien mitoituksessa huomioon otettavat GEO-murtorajatilat ovat kokonaisvakavuuden menetys, kantokestävyyden ylittyminen, lävistysmurtuma, pusertuminen, liukuminen, rakenteen ja maapohjan yhdistetty murtuminen. Lisäksi on otettava huomioon EQU-murtorajatilat.

2.2.2 Murtorajatilat kulmatukimuureille

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 93) mukaan tukirakenne on rakenne, joka tukee *"maasta, kalliosta tai täytöstä koostuvaa materiaalia ja vettä"*. Tukirakenteita on mitoituksen kannalta kolmea päätyyppiä: tukimuurit, upotetut seinät ja yhdistelmätukirakenteet, jotka ovat kahden ensimmäisen yhdistelmiä. Tukimuureja ovat *"kivi-, betoni- ja teräsbetoniseinät, joiden perustuksessa voi olla ulkoneva reunus, kanta tai tuki"*. Tukimuurin omapainolla on suuri merkitys tuennassa. Tukimuurit voidaan Briaudin (2013, s. 727) mukaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: massiivisiin tukimuureihin ja kulmatukimuureihin (kuva 2.1). Kulmatukimuuri koostuu pohjalaatasta ja pystymuurista. Kulmatukimuurin omapainoon luetaan myös taustatäyttö, joka on kuvassa 2.1 erotettu katkoviivalla.



Kuva 2.1. Massiivinen tukimuuri vasemmalla ja kulmatukimuuri oikealla. (Briaud 2013, s. 727)

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 29, 93–94) mukaan kulmatukimuurin mitoituksessa huomioon otettavat GEO-murtorajatilat ovat kokonaisvakavuuden menetys, kantokestävyyden ylittyminen, liukuminen, rakenteen ja maapohjan yhdistetty murtuminen, liiallinen vuoto ja tukiseinän siirtymisestä tai kaatumisesta aiheutuva sortuminen. Lisäksi on otettava huomioon EQU-murtorajatilat.

2.3 Nykyiset GEO-mitoitustavat

Nykyisten eurokoodien mitoitusmenettelyt perustuvat yleisesti osavarmuuslukumenettelyyn (EN 1990 2005, s. 16). Osavarmuuslukumenettelyssä parametrien ominaisarvoja joko kerrotaan (kuormat ja kuormien vaikutukset) tai jaetaan (lujuus ja kestävyys) osavarmuusluvulla. Lisäksi geometristen mittatietojen mitoitusarvot voidaan johtaa lisäämällä tai vähentämällä osavarmuusluvulla, jos mittatietojen poikkeamilla on *"merkittävä vaikutus rakenteen luotettavuuteen"*. Tällä menettelyllä otetaan huomioon parametrien ominaisarvoihin sisältyvä epävarmuus. (EN 1997-1 2013, s. 28–29)

Useimmat osavarmuusluvut ovat kansallisesti valittavia parametreja (NDP). Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 28–32) mukaan GEO-murtorajatilassa on osoitettava, että pätee yhtälö

$$E_d \le R_d, \tag{2.1}$$

jossa E_d on kuormien vaikutusten mitoitusarvo ja R_d on kestävyyden mitoitusarvo. Kuormien vaikutusten mitoitusarvo E_d voidaan laskea kohdistamalla kuormien osavarmuusluvut joko kuormien edustaviin arvoihin F_{rep} kaavalla

$$E_d = E\{\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\}, \tag{2.2}$$

tai kuorman vaikutuksiin *E* kaavalla

$$E_d = \gamma_E E\{F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\}.$$
(2.3)

Yhtälöiden γ_F on kuorman osavarmuusluku, γ_E on kuorman vaikutuksen osavarmuusluku, X_k on materiaaliparametrin ominaisarvo, γ_M on materiaaliparametrin osavarmuusluku ja a_d on mittatiedon mitoitusarvo. Kuorman edustava arvo F_{rep} lasketaan kuorman ominaisarvosta F_k kuorman yhdistelykertoimen ψ avulla seuraavasti

$$F_{rep} = \psi \cdot F_k. \tag{2.4}$$

Yhdistelykertoimen ψ arvo on pysyvillä kuormilla 1,0. Muuttuvilla kuormilla yhdistelykerroin ψ_0 , ψ_1 tai ψ_2 on arvoltaan 0–1,0 riippuen mitoitustilanteesta (EN 1990 2005, s. 60, 70).

Kestävyyden mitoitusarvot R_d voidaan laskea kohdistamalla osavarmuusluvut joko maan ominaisuuksiin X eli

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\}, \tag{2.5}$$

tai kestävyyteen R eli

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k; a_d\} / \gamma_R, \tag{2.6}$$

tai molempiin eli

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\} / \gamma_R, \qquad (2.7)$$

joissa γ_R on kestävyyden osavarmuusluku.

Nykyisessä eurokoodi 7:ssä on kolme mitoitustapaa, jotka määräävät miten yhtälöitä (2.2) – (2.7) käytetään: mitoitustapa 1 (DA1), mitoitustapa 2 (DA2) ja mitoitustapa 3 (DA3). Mitoitustapa määrittää mitä osavarmuuslukusarjaa käytetään kuormille tai kuormien vaikutuksille (A1 tai A2), maan lujuusparametreille (M1 tai M2) ja kestävyyksille (R1, R2, R3 tai R4). Eurokoodi 7 esittää suositellut arvot näille osavarmuuslukusarjoille liitteessä A (EN 1997-1 2013, s. 122–132), mutta sarjojen A1 ja A2 kansallisesti valitut arvot voidaan esittää standardin EN 1990 kansallisessa liitteessä ja sarjojen M1, M2, R1, R2, R3 ja R4 arvot standardin EN 1997-1 kansallisessa liitteessä. Taulukossa 2.1 on esitetty eurokoodi 7:n suositellut arvot kantokestävyyden ja liukumisen kannalta olennaisille osavarmuuslukusarjoille.

Parametri	Mer- kintä	Osavarmuuslukusarjat						
	KIIIta	A1	A2	M1	M2	R1	R2	R3
Pysyvä epäedullinen kuorma	N.	1,35	1,0					
Pysyvä edullinen kuorma	γG	1,0	1,0					
Muuttuva epäedullinen kuorma	Ve	1,5	1,3					
Muuttuva edullinen kuorma	γQ	0	0					
Maan tehokas sisäinen kitkakulma	¥φ'			1,0	1,25			
Tehokas koheesio	Yc'			1,0	1,25			
Suljettu leikkauslujuus	Ycu			1,0	1,4			
Kantokestävyys	γ R,v					1,0	1,4	1,0
Liukumiskestävyys	γ R,h					1,0	1,1	1,0

Taulukko 2.1. Nykyisen eurokoodi 7:n mitoitustavoissa suositellut osavarmuuslukusarjat kantokestävyyden ja liukumisen kannalta olennaisille parametreille (EN 1997-1 2013, s. 122–132).

Mitoitustavassa 1 (DA1) täytyy osoittaa yhtälön (2.1) päteminen kahdella eri osavarmuuslukujen yhdistelmällä. Yhdistelmässä 1 (DA1-1) käytetään kuormille osavarmuuslukusarjaa A1, maan lujuusparametreille osavarmuuslukusarjaa M1 ja kestävyyksille osavarmuuslukusarjaa R1. Yhdistelmässä 2 (DA1-2) käytetään kuormille osavarmuuslukusarjaa A2, maan lujuusparametreille osavarmuuslukusarjaa M2 ja kestävyyksille osavarmuuslukusarjaa R1. Varmuus on siis osoitettava molemmilla yhdistelmillä A1+M1+R1 ja A2+M2+R1.

Mitoitustavassa 2 (DA2) osoitetaan yhtälön (2.1) päteminen käyttämällä kuormille (DA2) tai kuormien vaikutuksille (DA2*) osavarmuuslukusarjaa A1, maan lujuusparametreille osavarmuuslukusarjaa M1 ja kestävyyksille osavarmuuslukusarjaa R2 eli yhdistelmällä A1+M1+R2.

Mitoitustavassa 3 (DA3) osoitetaan yhtälön (2.1) päteminen käyttämällä rakenteellisille kuormille tai rakenteellisten kuormien vaikutuksille osavarmuuslukusarjaa A1, geoteknisille kuormille osavarmuuslukusarjaa A2, maan lujuusparametreille osavarmuuslukusarjaa M2 ja kestävyyksille osavarmuuslukusarjaa R3 eli yhdistelmällä (A1 tai A2)+M2+R3.

2.3.1 Kuormitusyhdistelmät pysyvissä ja tilapäisissä mitoitustilanteissa

Nykyisen eurokoodin (EN 1990 2005 s. 78–80) mukaan kuormien vaikutusten mitoitusarvot E_d on määritettävä yhdistämällä kuormat, jotka esiintyvät samaan aikaan. Eurokoodi jakaa murtorajatilojen mitoitustilanteet normaalisti vallitseviin eli pysyviin (engl. persistent) ja tilapäisiin (engl. transient) mitoitustilanteisiin, onnettomuusmitoitustilanteisiin, maanjäristysmitoitustilanteisiin ja väsymistarkasteluihin. Normaalisti vallitseva eli pysyvä tarkoittaa koko suunnitellun käyttöiän ajan kestävää mitoitustilannetta, pois lukien rakenteen tai rakenneosien väsyminen. Tilapäinen tarkoittaa normaalisti vallitsevaa ajallisesti paljon lyhyempää mitoitustilannetta, joka kuitenkin todennäköisesti toteutuu. Onnettomuusmitoitustilanne sitä vastoin tarkoittaa epätodennäköistä ajallisesti lyhyttä mitoitustilannetta, kuten tulipalo, räjähdys, törmäys tai poikkeuksellinen paikallinen vaurio, pois lukien maanjäristyksen aiheuttamat olosuhteet.

Normaalisti vallitsevissa ja tilapäisissä mitoitustilanteissa, kuormitusyhdistelmä voidaan esittää nykyisen eurokoodin kaavalla 6.10

$$6.10: E_d = \sum_{j \ge 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \qquad (2.8)$$

jossa $\gamma_{G,j}$ on pysyvän kuorman *j* osavarmuusluku, $G_{k,j}$ on pysyvän kuorman *j* ominaisarvo, γ_P on esijännitysvoiman osavarmuusluku, *P* on esijännitysvoiman edustava arvo, $\gamma_{Q,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku, $Q_{k,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo, $\gamma_{Q,i}$ on muuttuvan kuorman *i* osavarmuusluku, $Q_{k,i}$ on muuttuvan kuorman *i* ominaisarvo ja $\psi_{0,i}$ on muuttuvan kuorman *i* yhdistelykerroin. Merkintä "+" tarkoittaa "yhdistämistä jonkin toisen kanssa".

STR- ja GEO-murtorajatiloissa voidaan käyttää eurokoodin kaavaparin 6.10a ja 6.10b epäedullisempaa kaavaa määrittämään kuormien vaikutusten mitoitusarvo *E*_d. Kaavapari on

6.10*a*:
$$E_d = \sum_{j \ge 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$
 ja (2.9)

$$6.10b: E_d = \sum_{j \ge 1} \xi \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \qquad (2.10)$$

jossa ξ on epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin ja $\psi_{0,1}$ on pääasiallisen muuttuvan kuorman yhdistelykerroin. Suomessa käytetään kaavaparia 6.10a ja 6.10b kanto- ja liukumiskestävyyden mitoituksessa.

2.3.2 Kanto- ja liukumiskestävyyden mitoitus Suomessa

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 59–62, 93–101) mukaan kestävyyden, tässä tapauksessa kantokestävyyden mitoitusarvon R_d on toteutettava kaava

$$V_d \le R_d, \tag{2.11}$$

jossa V_d on kohtisuoraan perustuksen tai tukimuurin pohjaan kohdistuvan voiman mitoitusarvo sisältäen perustuksen ja taustatäytön painon ja kaikki maanpaineet sekä perustuskuormasta aiheutumattomat vedenpaineet. Kantokestävyyden teoria ja ominaisarvon R_k laskeminen käsitellään luvussa 3. Kantokestävyyden mitoitusarvo R_d lasketaan ominaisarvosta luvun 2.3 mukaisesti.

Jotta perustus tai tukimuuri on mitoitettu liukumurtumaa vastaan, epäyhtälön

$$H_d \le R_d + R_{p,d} \tag{2.12}$$

on toteuduttava. H_d on vaakasuoraan perustuksen pohjaan kohdistuva mitoituskuorma sisältäen maanpaineen aiheuttaman työntövoiman, R_d on (liukumis)kestävyyden mitoitusarvo ja $R_{p,d}$ on liukumista vastustava maanpaineen resultantti perustuksen tai tukimuurin sivulla.

Avoimessa tilassa liukumiskestävyyden mitoitusarvo R_d lasketaan joko kohdistamalla osavarmuusluvut maan lujuuteen kaavalla

$$R_d = V'_d \tan \delta_d = V'_d \tan^{-1} \frac{\tan \delta_k}{\gamma_\delta},$$
(2.13)

tai kohdistamalla osavarmuusluvut maan kestävyyteen kaavalla

$$R_d = (V'_d \tan \delta_k) / \gamma_{R,h}. \tag{2.14}$$

Rakenteen ja maan välinen kitkakulma δ voidaan olettaa paikalla valetuilla betoniperustuksilla yhtä suureksi kuin kriittisen tilan tehokas leikkauskestävyyskulma φ'_{cv} ja sileillä elementtiperustuksilla yhtä suureksi kuin $2/3\varphi'_{cv}$. Kitkakulman δ osavarmuusluku γ_{δ} on yhtä kuin maan tehokkaan sisäisen kitkakulman osavarmuusluku $\gamma_{\varphi'}$. Tehokkaan kohtisuoraan perustuksen tai tukimuurin pohjaan kohdistuvan voiman mitoitusarvo V'_{d} on yhtä kuin ominaisarvo V'_{k} , kun käytetään mitoitusmenetelmää, jossa osavarmuusluvut kohdistetaan kuormien vaikutuksiin. V'_{d} on edullinen kuorma.

Suljetussa tilassa (ks. luku 3.5) liukumiskestävyyden mitoitusarvo R_d lasketaan joko kohdistamalla osavarmuusluvut maan lujuuteen kaavalla

$$R_d = A' c_{u,d} = A' \frac{c_{u,k}}{\gamma_{cu}},$$
(2.15)

tai kohdistamalla osavarmuusluvut maan kestävyyteen kaavalla

$$R_d = A' c_{u,k} / \gamma_{R,h}. \tag{2.16}$$

Parametrit $c_{u,k}$ ja $c_{u,d}$ ovat suljetun leikkauslujuuden ominais- ja mitoitusarvo. Perustuksen pohjan tehokas pinta-ala *A*' lasketaan suorakaiteiselle perustukselle tai tukimuurille kaavalla (3.40).

Suomessa antura- ja laattaperustusten sekä tukirakenteiden kantokestävyyden (sisältäen lävistysmurtuman) ja liukumiskestävyyden osalta käytetään eurokoodi 7:n kansallisten liitteiden (LVM NA EN 1997-1 2015, s. 2–3; YM NA EN 1997-1 2018, s. 27) mukaan mitoitustapaa 2 eli DA2 sekä infrarakenteille että rakennusten pohjarakenteille. Mitoitustavasta 2 on kaksi vaihtoehtoa: DA2 ja DA2*, joista Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisema eurokoodi 7:n kansallinen liite suosittelee mitoitustapaa DA2* infrarakenteille. Mitoitustavassa DA2 kuormien osavarmuudet kohdistetaan yhtälön (2.2) mukaisesti kuormiin ja mitoitustavassa DA2* yhtälön (2.3) mukaisesti kuorman vaikutuksiin.

Liikenne- ja viestintäministeriön julkaiseman eurokoodi 7:n kansallisen liitteen (LVM NA EN 1997-1 2015, s. 6) mukaan eurokoodi 7:n A1-osavarmuuslukusarjan (ks. taulukko 2.1) mukaiset kuormien osavarmuusluvut korvataan Liikenne- ja viestintäministeriön eurokoodin kansallisen liitteen (LVM NA EN 1990 2015, s. 7–8) taulukon A2.4(B) mukaisilla osavarmuusluvuilla. Kuormitusyhtälöt 6.10a ja 6.10b mitoitustavalla DA2 ilman esijännitysvoimia *P* ja kuormakerrointa K_{Fl} ovat siten

$$6.10a: E_d = 1,35 \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf}$$
 ja (2.17)

$$6.10b: E_d = 1,25 \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i},$$
(2.18)

jossa $G_{k,j,sup}$ on epäedullisen pysyvän kuorman *j* ominaisarvo ja $G_{k,j,inf}$ edullisen pysyvän kuorman *j* ominaisarvo. Muuttuvan epäedullisen kuorman osavarmuusluvun arvo on tieliikennekuormalle ja kevyen liikenteen kuormalle $\gamma_{Q,i} = 1,35$, raideliikenteen kuormalle yleisesti $\gamma_{Q,i} = 1,45$, raideliikenteen kuormalle SW/2 tai sen sisältämille yhdistelmille $\gamma_{Q,i} = 1,20$ ja muille $\gamma_{Q,i} = 1,50$.

Ympäristöministeriön julkaiseman eurokoodi 7:n kansallisen liitteen (YM NA EN 1997-1 2018, s. 38) mukaan mitoitustavalla DA2 käytetään kuormitusyhtälöitä 6.10a ja 6.10b, jotka ovat ilman kuormakerrointa K_{Fl}

$$6.10a: E_d = 1,35 \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf}$$
 ja (2.19)

$$6.10b: E_d = 1,15 \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf} + 1,5 \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}.$$

$$(2.20)$$

<u>Yhdistelykertoimista</u> $\psi_{0,i}$ on esitetty eurokoodin liitteessä A (EN 1990 2005, s. 86, 98– 106) suositellut arvot, mutta ne voidaan määritellä kansallisessa liitteessä. Suomessa YM:n julkaisemassa kansallisessa liitteessä (YM NA EN 1990 2016, s. 17–18) on määritetty yhdistelykertoimet rakennuksille ja LVM:n julkaisemassa kansallisessa liitteessä (LVM NA EN 1990, s. 4–5) tie- ja rautatiesilloille.

<u>Kuormien epäkeskisyys</u> antura- ja laattaperustusten ja tukimuurien murtorajatiloissa on otettava huomioon nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 62) mukaan. Kun epäkeskisyys on yli 1/3 suurempi kuin suorakulmaisen perustuksen leveys tai yli 0,6-kertainen suhteessa ympyräperustuksen säteeseen, on ryhdyttävä *"erityisiin varotoimenpiteisiin"*, kuten *"kuormien mitoitusarvojen huolelliseen uudelleen tarkasteluun"* ja *"perustuksen reunan sijainnin suunnitteluun rakentamistoleranssien suuruus huomioon ottaen"*. Näihin määräyksiin ei sallita kansallista valintaa. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että nykyinen eurokoodi rajoittaisi kuormien epäkeskisyyttä tiettyyn arvoon (Frank et al. 2005, s. 80). Jos neliöanturan tai kulmatukimuurin mitoituksessa on epäkeskisyyttä vain leveyssuunnassa ja jos *"erityisiin varotoimenpiteisiin"* ei haluta ryhtyä, voidaan edellä mainitusta johtaa ehto, että epäkeskisyys e_B suhteessa neliöanturan perustuksen tai kulmatukimuurin pohjan leveyteen *B* tulee toteuttaa ehto

$$\frac{e_B}{B} \le \frac{1}{3}.$$

Nykyinen eurokoodi ei täsmennä lasketaanko epäkeskisyys e_B pysyvien ja muuttuvien kuormien mitoitusarvoilla $G_{d,j}$ ja $Q_{d,j}$ vai ominaisarvoilla $G_{k,j}$ ja $Q_{k,j}$. Usein käytäntönä on, että mitoitustavalla DA2* epäkeskisyys e_B rajoitetaan yhtälön (2.21) mukaisesti (Frank et al. 2005, s. 77). Silloin epäkeskisyys e_B lasketaan pysyvien ja muuttuvien kuormien ominaisarvoilla $G_{k,j}$ ja $Q_{k,j}$. Mitoitustavalla DA2 epäkeskisyysehto (2.21) katsotaan yleensä tarpeettomaksi, koska epäkeskisyyden epävarmuus otetaan huomioon kanto-kestävyyttä laskettaessa.

YM:n julkaisema kansallinen liite (YM NA EN 1990 2016, s. 32) sekä Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohje (NCCI 7 2023, s. 47-48) määräävät mitoitustavalle DA2* lisäehdot epäkeskisyydelle. Käytettäessä maanvaraisen perustuksen murtorajatilamitoitukseen mitoitustapaa DA2* epäkeskisyys ei saa olla sellaisen ellipsin (kuva 2.2) ulkopuolella, jonka keskipiste on perustuksen pohjan keskipiste, ja jonka puoliakselit ovat kolmasosat leveydestä B ja pituudesta L. Lisäksi YM:n julkaisema kansallinen liite määrää, ettei pysyvien kuormien resultantin epäkeskisyys saa olla yli 1/6 perustuksen leveydestä tai pituudesta (sydänkuvio kuvassa 2.2). Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohje asettaa saman ehdon siltojen tukien perustuksille. Nämä lisäehdot johtuvat siitä, että epäkeskisyydelle ei kohdistu varmuutta, koska epäkeskisyys lasketaan kuormien perusteella ja mitoitustavassa DA2* varmuus kohdistuu kuorman vaikutuksiin eikä kuormiin. Lisäksi pysyvien kuormien resultantin epäkeskisyyden raja 1/6 perustuu siihen, että koko perustuksen pohja on silloin puristettuna (YM NA EN 1990 2016, s. 32).



Kuva 2.2. Maanvaraisen perustuksen epäkeskisyyttä rajoittavat ellipsi ja sydänkuvio mitoitustavalla DA2*. (NCCI 7 2023, s. 48)

Mitoitustavalla DA2* epäkeskisyyden e_B suhteessa neliöanturan perustuksen ja kulmatukimuurin pohjan leveyteen *B* on siis toteutettava ehto

$$\frac{e_{B,k}}{B} \le \frac{1}{3},\tag{2.22}$$

kun epäkeskisyys $e_{B,k}$ lasketaan pysyvien ja muuttuvien kuormien ominaisarvoilla $G_{k,j}$ ja $Q_{k,j}$ ja ehto

$$\frac{e_{B,G,k}}{B} \le \frac{1}{6},$$
 (2.23)

kun epäkeskisyys $e_{B,G,k}$ lasketaan pelkkien pysyvien kuormien ominaisarvoilla $G_{k,j}$.

Mitoitustavassa 2 maan lujuusparametreille ei kohdisteta varmuutta eli näiden osavarmuusluvut ovat arvoltaan 1,0 (taulukko 2.1). Eurokoodi 7:n Suomen kansallisten liitteiden (LVM NA EN 1997-1 2015; YM NA EN 1997-1 2018, s. 39) mukaiset mitoitustavan 2 kestävyyden osavarmuudet on esitetty taulukossa 2.2.

Taulukko 2.2. Antura- ja laattaperustuksilla sekä tukirakenteilla kanto- ja liukumiskestävyyden osavarmuusluvut R2 Suomen kansallisten liitteiden mukaisesti (LVM NA EN 1997-1 2015: YM NA EN 1997-1 2018, s. 39)

Kestävyysparametri	Merkintä	R2		R2		R2	
		LVM	YM				
Kantokestävyys	γ R,v	1,55	1,55				
Liukumiskestävyys	γ R,h	1,10	1,10				

2.4 Uudet GEO-mitoitustavat

Uusien eurokoodien mitoitusmenettelyt perustuvat pääasiassa osavarmuuslukumenettelyyn (EN 1990 2023, s. 10) kuten nykyiset eurokoodit. Yhtälö (2.1) pätee myös uuden eurokoodi 7:n luonnoksessa (prEN 1997-3 2022, s. 71), joka viittaa samaan yhtälöön uudessa eurokoodissa (EN 1990 2023, s. 48). Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 42) mukaan kuormien vaikutusten mitoitusarvo E_d voidaan laskea joko uuden eurokoodin (EN 1990 2023, s. 49–50) kaavalla 8.4 eli kohdistamalla osavarmuusluvut kuormien ominaisarvoihin F_k

8.4:
$$E_d = E\{\sum F_d; a_d; X_{Rd}\} = E\{\sum (\gamma_F \psi F_k); a_d; X_{Rd}\},$$
 (2.24)

tai kaavalla 8.5 kohdistamalla osavarmuusluvut kuorman vaikutuksiin E eli

8.5:
$$E_d = \gamma_E E\{\sum F_{rep}; a_d; X_{rep}\} = \gamma_E E\{\sum (\psi F_k); a_d; X_{rep}\}.$$
 (2.25)

Parametri $X_{Rd} = X_{rep}/\gamma_M$ on materiaaliparametrin mitoitusarvo ja $X_{rep} = \eta X_k$ materiaaliparametrin edustava arvo. Konversiokerroin η on arvoltaan 1,0 (prEN 1997-1 2022, s. 39), kun mittakaavan, kosteuden, lämpötilan, materiaalin ikääntymisen, anisotropian, jännityspolun ja jännitystason vaikutukset sisältyvät valittuun ominaisarvoon. Käytäntö kaavalla (2.24) on siis sama kuin nykyisen eurokoodi 7:n kaavalla (2.2). Mutta kaava (2.25) eroaa nykyisen eurokoodi 7:n kaavasta (2.3) siten, että materiaaliparametrista käytetään edustavaa arvoa mitoitusarvon sijaan. Uusissa eurokoodeissa ei siis kohdisteta osavarmuuslukua materiaaliparametreihin, kuten maan lujuuteen, kun varmuus kohdistuu kuormien vaikutuksiin kuormien sijaan. Käytännössä nykyisen eurokoodi 7:n murtorajatilan mitoitustavoilla kaava (2.3) ei kuitenkaan eroa kaavasta (2.25), koska näillä mitoitustavoilla materiaaliparametrein osavarmuusluku on 1,0, kun varmuus kohdistuu kuormien vaikutuksiin kuormien sijaan (ks. luku 2.3).

Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-1 2022, s. 42–45) mukaan kestävyyden mitoitusarvot R_d lasketaan kohdistamalla osavarmuusluvut joko maan ominaisuuksiin X tai kestävyyteen R kuten nykyisen eurokoodi 7:n kaavoilla (2.5) ja (2.6), mutta ei molempiin kuten kaavalla (2.7). Kaavaa (2.7) ei kuitenkaan käytetä nykyisen eurokoodi 7:n mitoitustavoilla murtorajatiloissa. Lisäksi maan lujuusparametrin ominaisarvon X_k sijaan kaavoissa käytetään maan lujuusparametrin edustavaa arvoa X_{rep} . Uudessa eurokoodi 7:n luonnoksessa mitoitustapoja, joissa osavarmuusluvut kohdistetaan maan ominaisuuksiin X, kutsutaan nimellä "material factor approach (MFA)" (suom. materiaaliosavarmuuslukumenettely), ja mitoitusmenettelyjä, joissa osavarmuusluvut kohdistetaan kestävyyteen R, nimellä "resistance factor approach (RFA)" (suom. kestävyysosavarmuuslukumenettely). Uudessa eurokoodi 7:n luonnoksessa (prEN 1997-1 2022, s. 43) MFA

sisältää normaaleissa ja tilapäisissä mitoitustilanteissa kaksi osavarmuuslukusarjaa maan lujuusparametreille, M1 ja M2.

Uudessa eurokoodissa (EN 1990 2023, s. 70) on neljä eri tapaa, joilla osavarmuusluku kohdennetaan kuormiin tai kuormien vaikutuksiin murtorajatiloissa. Näitä tapoja kutsutaan termillä "verification case" (suom. todentamistapa). Uuden eurokoodin liitteessä A (EN 1990 2023, s. 71, 97–98) määritetään osavarmuusluvut näille neljälle tavalle VC1, VC2, VC3 ja VC4. Tavoilla VC1, VC2 ja VC3 osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin *F* ja tavalla VC4 kuormien vaikutuksiin *E*. VC2:sta on kaksi sarjaa, VC2(a) ja VC2(b), joista käytetään epäedullisempaa yhdistelmää.

2.4.1 Kuormitusyhdistelmät pysyvissä ja tilapäisissä mitoitustilanteissa

Uuden eurokoodin (EN 1990 2023, s. 54–55) mukaan kuormien vaikutusten mitoitusarvot E_d on määritettävä yhdistämällä kuormat, jotka esiintyvät samaan aikaan kuten nykyisessä eurokoodissakin. Uusi eurokoodi esittää kuitenkin nykyisen eurokoodin kuormien vaikutusten E_d yhdistelmien 6.10, 6.10a ja 6.10b (ks. kaavat 2.8–2.10) sijaan kaavat kuormien yhdistelmille ΣF_d . Normaalisti vallitsevissa ja tilapäisissä mitoitustilanteissa kuormien yhdistelmä tulee laskea uuden eurokoodin kaavalla 8.12

8.12:
$$\sum F_d = \sum_{j \ge 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} + (\gamma_P P_k),$$
 (2.26)

paitsi jos kansallinen liite antaa muita vaihtoehtoja, jolloin kuormien yhdistelmä voidaan laskea kaavaparin 8.13 kaavoista epäedullisemmalla tai kaavaparin 8.14 kaavoista epäedullisemmalla. Kaavaparin 8.13 kaavat on nimetty tässä työssä selkeyden vuoksi 8.13a ja 8.13b ja kaavaparin 8.14 kaavat 8.14a ja 8.14b. Kaavapari 8.13a ja 8.13b on

8.13*a*:
$$\sum F_d = \sum_{j \ge 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} + (\gamma_P P_k)$$
 (2.27)

8.13b:
$$\sum F_d = \sum_{j \ge 1} \xi \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} + (\gamma_P P_k),$$
 (2.28)

ja kaavapari 8.14a ja 8.14b on

8.14*a*:
$$\sum F_d = \sum_{j \ge 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + (\gamma_P P_k)$$
 ja (2.29)

8.14b:
$$\sum F_d = \sum_{j\geq 1} \xi \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} + (\gamma_P P_k),$$
 (2.30)

joissa epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin ξ = 0,85 paitsi, jos kansallisesti toisin määritetään. Lisäksi tulo $\xi \gamma_{G,j}$ ei saa olla alle 1,0 (EN 1990 2023, s. 70, 96).

Uuden eurokoodin kuormitusyhtälö 8.12 (2.26) on hyvin samanlainen kuin nykyisen eurokoodin kuormitusyhtälö 6.10 (2.8), ja kuormitusyhtälöt 8.13a (2.27) ja 8.13b (2.28) ovat hyvin samanlaiset kuin nykyisen eurokoodin kuormitusyhtälöt 6.10a (2.9) ja 6.10b (2.10).

Kaavat 8.14a (2.29) ja 8.14b (2.30) taas ovat hyvin samanlaiset kuin Suomen kansallisten liitteiden mukaiset mitoitustavalle DA2 eli LVM:n kuormitusyhtälöt 6.10a (2.17) ja 6.10b (2.18) sekä YM:n kuormitusyhtälöt 6.10a (2.19) ja 6.10b (2.20).

<u>Yhdistelykertoimista</u> $\psi_{0,i}$ on esitetty uuden eurokoodin liitteessä A (EN 1990 2023, s. 68– 69, 87–96) suositellut arvot, mutta ne ovat myös kansallisesti määritettäviä (NDP).

2.4.2 Kanto- ja liukumiskestävyyden mitoitus

Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 68–73) mukaan mitoituskantokestävyyden R_{Nd} on toteutettava kaava

$$N_d \le R_{Nd}, \tag{2.31}$$

jossa N_d on kohtisuoraan perustuksen pohjaan kohdistuvan voiman mitoitusarvo. Vaakakuormitetun perustuksen kantokestävyysmitoituksessa on tarkasteltava pystykuormia erikseen sekä edullisina että epäedullisina. Tämä on ollut jo nykyisin yleinen käytäntö kantokestävyysmitoituksessa (NCCI 7 2023, s. 29–30). Kantokestävyyden teoria ja ominaisarvon R_{Nk} laskeminen käsitellään luvussa 3. Kantokestävyyden mitoitusarvo R_{Nd} lasketaan ominaisarvosta luvun 2.4 mukaisesti.

Liukumiskestävyys on mitoitettava siten, että toteutuu epäyhtälö

$$T_d \le R_{Td,base} + R_{Td,face} \tag{2.32}$$

jossa T_d on tangentiaalisesti perustuksen pohjaan kohdistuvan voiman mitoitusarvo sisältäen maanpaineen aiheuttaman työntövoiman, $R_{Td,base}$ on perustuksen tai tukimuurin pohjan liukumiskestävyyden mitoitusarvo ja $R_{Td,face}$ on liukumista vastustavan maanpaineen resultantin mitoitusarvo perustuksen tai tukimuurin sivulla. Uusien eurokoodien kantokestävyysehto (2.31) ja liukumiskestävyysehto (2.32) ovat vaakasuoralla perustuksen pohjalla samat kuin nykyisten eurokoodien kantokestävyysehto (2.11) ja liukumiskestävyysehto (2.12).

Avoimessa tilassa (ks. luku 3.3.3) liukumiskestävyyden mitoitusarvo R_{Td} lasketaan joko kohdistamalla osavarmuusluvut maan lujuuteen (MFA) kaavalla

$$R_{Td} = \left(N_{G,d,fav} - U_d\right) \tan \delta_d = \frac{\tan \delta_k}{\gamma_\delta},\tag{2.33}$$

tai kohdistamalla osavarmuusluvut kuormiin (VC1) ja maan kestävyyteen (RFA) kaavalla

$$R_{Td} = \frac{(N_{G,d,fav} - U_d) \tan \delta_{rep}}{\gamma_{RT}},$$
(2.34)

tai kohdistamalla osavarmuusluvut kuormien vaikutuksiin (VC4) ja maan kestävyyteen (RFA) kaavalla

$$R_{Td} = \frac{(N_{G,rep,fav} - U_{rep})\tan\delta_{rep}}{\gamma_{RT}}.$$
(2.35)

Kaavoissa $N_{G,d,fav}$ ja $N_{G,rep,fav}$ ovat kohtisuoraan perustuksen tai tukimuurin pohjaan kohdistuvan pysyvän voiman mitoitusarvo ja edustava arvo, ja ne katsotaan edullisiksi kuormiksi. U_d ja U_{rep} ovat perustuksen tai tukimuurin pohjaan kohtisuorasti kohdistuvan nosteen mitoitusarvo ja edustava arvo. γ_{RT} on liukumiskestävyyden osavarmuusluku.

Rakenteen ja maan välinen kitkakerroin tan δ toteuttaa epäyhtälön

$$\tan \delta \le k_{\tan \delta} \tan \varphi', \tag{2.36}$$

jossa $k_{\tan\sigma}$ on vähennyskerroin, joka riippuu perustuksen materiaalista ja toteutustavasta. Sen arvo on 1,0 paikalla valetuilla karkeapohjaisilla betoniperustuksilla ja 2/3 paikalla valetuilla sileäpohjaisilla betoniperustuksilla sekä elementtiperustuksilla.

Suljetussa tilassa liukumiskestävyyden mitoitusarvo R_{Tud} lasketaan joko kohdistamalla osavarmuusluvut maan lujuuteen (MFA) kaavalla

$$R_{Tud} = A_{red} k_{cu} c_{u,d} = A_{red} k_{cu} \frac{c_{u,rep}}{\gamma_{cu}},$$
(2.37)

tai kohdistamalla osavarmuusluvut maan kestävyyteen (RFA) kaavalla

$$R_d = \frac{A_{red}k_{cu}c_{u,rep}}{\gamma_{RT}},\tag{2.38}$$

joissa A_{red} on perustuksen pohjan pinta-alasta maahan puristuskontaktissa oleva osuus, $c_{u,rep}$ on suljetun leikkauslujuuden edustava arvo, γ_{cu} on suljetun leikkauslujuuden osavarmuusluku ja k_{cu} on vähennyskerroin, joka riippuu perustuksen materiaalista ja toteutustavasta. Vähennyskertoimen k_{cu} arvo on 1,0 paikalla valetuilla karkeapohjaisilla betoniperustuksilla ja 2/3 paikalla valetuilla sileäpohjaisilla betoniperustuksilla sekä elementtiperustuksilla.

Uuden eurokoodi 7:n luonnoksessa (prEN 1997-3 2022, s. 76–78) määritetään anturaja laattaperustusten kantokestävyyden (sisältäen lävistysmurtuman) ja liukumiskestävyyden mitoittamiseen viisi eri kuormaosavarmuuslukujen kohdentamistapojen VC1, VC3 ja VC4 ja lujuuden ja kestävyyden mitoitustapojen MFA ja RFA yhdistelmää. Nämä yhdistelmät (*a*), (*b*), (*c*), (*d*) ja (*e*) on esitetty taulukossa 2.3. γ_{RN} on kantokestävyyden osavarmuusluku. Yhdistelmiä (*a*) ja (*b*) käytetään aina yhdessä valiten niistä epäedullisempi määrääväksi yhdistelmäksi. Tämä vastaa nykyistä mitoitustapaa DA1. Yhdistelmä (*c*) ei vastaa suoraan mitään nykyistä mitoitustapaa, mutta se on lähellä nykyistä mitoitustapaa DA3 rakenteellisten kuormien osalta. Yhdistelmä (*d*) on lähellä nykyistä mitoitustapaa DA2 ja yhdistelmä (*e*) nykyistä mitoitustapaa DA2*.

Parametri	Mer- MFA			RFA		
	Kinta	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Kuormat ja kuormien vaikutukset	γ <i></i> , γ _E	VC1	VC3	VC1	VC1	VC4
Maan lujuusparametrit	γм	M1 M2 M2 eik		ei kä	ytetä	
Kantokestävyys	γrn	ei käytetä 1,4			,4	
Liukumiskestävyys	γrt	ei käytetä 1,1		,1		

Taulukko 2.3. Kuormaosavarmuuslukujen kohdentamistapojen VC1, VC3 ja VC4 ja mitoitusmenettelyiden MFA ja RFA yhdistelmät antura- ja laattaperustusten kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden mitoittamiseen (EN 1990 2023, s. 76–78).

Tukirakenteiden kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden mitoittamiseen (prEN 1997-3 2022, s. 131–133) on myös 5 eri kuormaosavarmuuslukujen kohdentamistapojen VC1, VC3 ja VC4 ja lujuuden ja kestävyyden mitoitustapojen MFA ja RFA yhdistelmää. Nämä yhdistelmät *(a)*, *(b)*, *(c)*, *(d)* ja *(e)* on esitetty taulukossa 2.4. Yhdistelmiä *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä valiten niistä epäedullisempi määrääväksi yhdistelmäksi. Tämä vastaa nykyistä mitoitustapaa DA1 paitsi DA1-1:ssä osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin, kun taas *(a)* kohdistaa osavarmuusluvut kuormien vaikutuksiin.

Taulukko 2.4. Kuormaosavarmuuksien kohdentamistapojen VC1, VC3 ja VC4 ja mitoitusmenettelyiden MFA ja RFA yhdistelmät tukirakenteiden kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden mitoittamiseen (EN 1990 2023, s. 131–133).

Parametri	Merkintä	MFA RFA			FA	
		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Kuormat ja kuormien vaikutukset	γ _F , γ _E	VC4	VC3	VC1	VC1	VC4
Maan lujuusparametrit	γм	M1 M2 M2 ei kä		ytetä		
Kantokestävyys	γ _{RN}	ei käytetä 1,4			,4	
Liukumiskestävyys	γrt	ei käytetä 1,1			,1	

Kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden mitoittamisen yhdistelmät (a), (b), (c), (d) ja (e) ovat siis muuten identtiset antura- ja laattaperustuksilla sekä tukirakenteilla, mutta yhdistelmä (a) on antura- ja laattaperustuksilla VC1 ja M1 ja tukirakenteilla VC4 ja M1. Taulukossa 2.5 on esitetty osa VC1:n, VC3:N ja VC4:n osavarmuusluvuista rakennusten mitoittamiseen ja taulukossa 2.6 siltojen mitoittamiseen.

Taulukko 2.5. VC1:n, VC3:N ja VC4:n osavarmuusluvut kuormille ja kuormien vaikutuksille rakennusten mitoittamiseen (EN 1990 2023, s. 69–71).

Kuorma tai kuorman vaikutus				Osavarmuusluku			
Тууррі		Merkintä	VC1	VC3	VC4		
Pysyvä kuorma	epäedullinen	γg	1,35 <i>k</i> ⊧	1,0	ei käytetä		
	edullinen	Y G,fav	1,0	1,0			
Pysyvä vesikuorma	epäedullinen	γ _{Gw}	1,2 <i>k</i> ⊧	1,0			
Muuttuva kuorma	epäedullinen	Yq	1,5k _F	1,3	<i>γ</i> Q,red		
	edullinen	ŶQ,fav	0	0	0		
Pysyvä kuorman vaikutus	epäedullinen	γe	ei käy	rtetä	1,35k _F		
	edullinen	γE,fav	ei käy	rtetä	1,0		

Kuorma tai kuorman vaikutus			Osavarmuusluku			
Тууррі		Merkintä	VC1	VC3	VC4	
Pysyvä kuorma	epäedullinen	γ _G	1,35 <i>k</i> _F	1,0		
	edullinen	γ G,fav	1,0	1,0	ei käytetä	
Pysyvä vesikuorma	epäedullinen	γ _{Gw}	1,2 <i>k</i> ⊧	1,0		
Muuttuva raideliikennekuorma	epäedullinen		1,45 <i>k</i> _F	1,25		
(pl. SW/2, gr16, gr17)		No.				
Muuttuva tieliikennekuorma	epäedullinen	γο	1,35 <i>k</i> ⊧	1,15	γQ,red	
Muu muuttuva kuorma	epäedullinen		1,5k _F	1,3		
Muuttuva kuorma	edullinen	γQ,fav	0	0	0	
Pysyvä kuorman vaikutus	epäedullinen	ŶΕ	ei kä	ytetä	1,35k _F	
	edullinen	Υ E,fav	ei kä	ytetä	1,0	

Taulukko 2.6. VC1:n, VC3:N ja VC4:n osavarmuusluvut kuormille ja kuormien vaikutuksille siltojen mitoittamiseen (EN 1990 2023, s. 97–99).

Seuraamuskerroin (engl. consequence factor) k_F määritetään seuraamusluokan mukaisesti ja sen arvot voidaan valita kansallisesti. Osavarmuusluku $\gamma_{Q,red}$ lasketaan VC1:n muuttuvan kuorman osavarmuusluvun γ_Q ja VC1:n pysyvän kuorman osavarmuusluvun γ_G suhteesta

$$\gamma_{Q,red} = \gamma_Q / \gamma_G. \tag{2.39}$$

Mitoitustavalla VC4 ei käytetä epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerrointa ξ kuormitusyhtälöllä 8.13b tai 8.14b toisin kuin nykyisellä mitoitustavalla DA2*, jota mitoitustapa (e) VC4+RFA muistuttaa. Tämä johtuu siitä, ettei pysyviin kuormiin kohdisteta osavarmuuslukua käytettäessä VC4:ä (EN 1990 2023, s. 71, 97). Kun käytetään näitä kuormitusyhtälöitä, kun ne ovat määrääviä ja kun kaikki kuormat ovat pysyviä, kuormien vaikutusten mitoitusarvo E_d mitoitustavalla (e) VC4+RFA on suurempi kuin mitoitustavalla DA2*. Tämä johtuu siitä, että mitoitustavalla (e) VC4+RFA kuormien vaikutusten osavarmuusluvun oletusarvo $\gamma_E = 1,35$ (NDP) on suurempi kuin mitoitustavalla DA2*, jolla käytetään Suomessa pysyvän kuorman osavarmuuslukua $\xi \gamma_G = 1,15$ tai $\xi \gamma_G = 1,25$. Toisaalta myöskään muuttuvat kuormat eivät tätä asetelmaa muuta, jos kuormien vaikutusten laskenta on lineaarinen. Tämä siksi, että mitoitustavalla (e) VC4+RFA kuormien vaikutusten osavarmuusluvun γ_E ja muuttuvien kuormien osavarmuusluvun $\gamma_{Q,red}$ tulo on $\gamma_E \gamma_{Q,red} = \gamma_E \gamma_Q / \gamma_G$, joka on yhtä kuin VC1:n γ_Q , kun käytetään VC1:n oletusarvoa $\gamma_G =$ 1,35 ja VC4:n oletusarvoa y_E = 1,35. Joten muuttuvien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo on sama kuin mitoitustavalla DA2*, kun DA2*:n γ_Q on sama kuin VC1:n γ_Q , kuten oletusarvoisesti on. Lisäksi mitoitustapa (e) VC4+RFA poikkeaa suuresti mitoitustavasta DA2* ehdon $T_{rep} \leq 0, 2N_{rep}$ (2.40) takia.

Taulukossa 2.7 on esitetty uuden eurokoodi 7:n luonnoksen maan lujuusparametrien osavarmuuslukusarjat M1 ja M2 kantokestävyyden ja liukumisen kannalta olennaisimmille parametreille GEO-murtorajatiloissa.

1997-1 2022, S. 43).			
Parametri	Mer- kintä	M1	M2
Maan tehokas sisäinen kitkakulma	$oldsymbol{\gamma} arphi^{'}$	1,0	1,25
Tehokas koheesio	γc'	1,0	1,25
Suljettu leikkauslujuus	Ycu	1,0	1,40

Taulukko 2.7. Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen maan lujuusparametrien osavarmuuslukusarjat M1 ja M2 diplomityössä olennaisille parametreille GEO-murtorajatiloissa (prEN 1997-1 2022, s. 43).

<u>Kuormien epäkeskisyys</u> antura- ja laattaperustusten ja tukimuurien murtorajatiloissa on otettava huomioon uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 72) kohdan 5.6.2.2(6) mukaan samalla tavalla kuin nykyisessä eurokoodi 7:ssä: kun epäkeskisyys on yli 1/3 suurempi kuin suorakulmaisen perustuksen leveys tai yli 0,6-kertainen suhteessa ympyräperustuksen säteeseen, on ryhdyttävä *"erityisiin varotoimenpiteisiin"*, kuten *"kuormien mitoitusarvojen huolelliseen uudelleen tarkasteluun"* ja *"perustuksen reunan sijainnin suunnitteluun rakentamistoleranssien suuruus huomioon ottaen"*. Ei ole kuitenkaan täysin yksiselitteistä, viittaako tämä kohdan 5.6.2.2(6) epäkeskisyys (engl. the eccentricity) kohdan 5.6.2.2(5) mitoitusepäkeskisyys lasketaan käyttäen kunkin mitoitustavan mukaisia kuormien mitoitusarvoja. Tämä poikkeaa nykyisen eurokoodin yleisistä käytännöistä (ks. luku 2.3.2).

Lisäksi käyttörajatiloissa kuormien ominaisarvoilla laskettavan ympyräperustuksen epäkeskisyyden e, leveyssuuntaisen epäkeskisyyden e_B ja pituussuuntaisen epäkeskisyyden e_L , on täytettävä taulukon 2.8 mukaiset ehdot nauhaperustuksella, ympyräperustuksella ja suorakulmaisella perustuksella, jotta estetään raon muodostuminen perustuksen alle (prEN 1997-3 2022, s. 78).

s. 78).			
Kuormitus	Nauhaperustus	Ympyräperustus	Suorakulmainen perustus
	-		
Pysyvät kuormat	$e_B = 1$	e 1	e_B e_L 1
	$\overline{B} \leq \overline{6}$	$\frac{-}{R} \leq \frac{-}{4}$	$\frac{1}{B} + \frac{1}{L} \le \frac{1}{6}$
Pysyvät ja muuttuvat	$e_B = 1$	$\frac{e}{-} < 0.59$	$\begin{bmatrix} e_B \end{bmatrix}^2 \begin{bmatrix} e_L \end{bmatrix}^2 = 1$
kuormat	$\overline{B} \ge \overline{3}$	R^{-1} 0,59	$\left[\frac{B}{B}\right] + \left[\frac{B}{L}\right] \leq \frac{B}{9}$

Taulukko 2.8. Uuden eurokoodin mukaiset epäkeskisyysehdot käyttörajatiloissa nauhaperustuksella, ympyräperustuksella ja suorakulmaisella perustuksella (prEN 1997-3 2022, s 78)

Kun käytetään yhdistelmää (e) eli VC4 ja RFA antura- ja laattaperustuksien tai tukirakenteiden mitoituksessa, pitää toteutua ehto $T_{rep} \leq 0, 2N_{rep},$

jossa T_{rep} ja N_{rep} ovat ovat tangentiaalisesti ja kohtisuoraan perustuksen pohjaan kohdistuvien voimien edustavat arvot (prEN 1997-3 2022, s. 77, 132–133). " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehto (2.40) perustuu saksalaiseen tapaan rajoittaa vaakakuormia ja edelleen epä-keskisyyttä ja kuormien vinoutta rajoittamiseen mitoitustavoilla, joilla epäkeskisyys lasketaan ominaisarvoilla (Vogt 2019).

2.5 EQU-mitoitustavat

EQU-murtorajatila tarkoittaa rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettämistä, kun rakenne tai maapohja oletetaan jäykäksi kappaleeksi. EQU-murtorajatiloissa rakennemateriaalien ja maan lujuudet oletetaan merkityksettömiksi kestävyyden kannalta toisin kuin STR- ja GEO-murtorajatiloissa. Nykyisen eurokoodi 7:n mukaan staattisen tasapainon osoittaminen geoteknisessä mitoituksessa rajoittuu lähinnä jäykkiin perustuksiin kallion päällä. (EN 1997-1 2013, s. 29–31)

2.5.1 Nykyiset EQU-mitoitustavat Suomessa

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 28–32) mukaan staattisen tasapainon murtorajatilassa eli EQU-murtorajatilassa on osoitettava, että pätee yhtälö

$$E_{dst,d} \le E_{stb,d} + R_{EQU,d}. \tag{2.41}$$

Kaatavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo Edst,d noudattaa yhtälöä

$$E_{dst,d} = E\{\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\}_{dst}.$$
(2.42)

Vakauttavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo Estb, d noudattaa yhtälöä

$$E_{stb,d} = E\{\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\}_{stb}.$$
(2.43)

Yleensä EQU-murtorajatilan mitoitusleikkauskestävyyttä $R_{EQU,d}$ (lähteessä T_d) ei oteta huomioon, mutta jos otetaan, *"sen merkityksen tulisi olla vähäinen"*. Yhtälöissä (2.41) – (2.43) käytetyt normaaleissa ja tilapäisissä mitoitustilanteissa osavarmuusluvut γ_F ja γ_M on määritetty nykyisen eurokoodi 7:n liitteessä A (EN 1997-1 2013, s. 122–123), mutta ne voidaan määrittää myös kansallisissa liitteissä.

Suomessa staattisen tasapainotilan osoittamisen osalta käytetään eurokoodi 7:n kansallisten liitteiden (LVM NA EN 1997-1 2015; YM NA EN 1997-1 2018) mukaisia kuormitusyhtälöitä ja kuormien osavarmuuslukuja. Liikenne- ja viestintäministeriön eurokoodi 7:n kansallisen liitteen (LVM NA EN 1997-1 2015, s. 6) mukaan EQU-murtorajatilassa euro-

(2.40)
koodi 7:n taulukon A.1 kuormien osavarmuusluvut korvataan Liikenne- ja viestintäministeriön eurokoodin kansallisen liitteen (LVM NA EN 1990 2015, s. 6) taulukon A2.4(A) mukaisella yhtälöllä 6.10, joka on kaatavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvolle *E*_{dst,d}

$$6.10: E_{dst,d} = 1,15 \cdot G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i},$$
(2.44)

ja vakauttavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvolle Estb,d

$$6.10: E_{dst,d} = 0.9 \cdot G_{kj,inf}, \tag{2.45}$$

ilman esijännitysvoimia P ja kuormakerrointa K_{FI} .

Muuttuvan epäedullisen kuorman osavarmuusluku arvo on tieliikennekuormalle ja kevyen liikenteen kuormalle $\gamma_{Q,i} = 1,35$, raideliikenteelle $\gamma_{Q,i} = 1,45$ tai $\gamma_{Q,i} = 1,20$ ja muille $\gamma_{Q,i} = 1,50$.

Ympäristöministeriön julkaiseman eurokoodi 7:n kansallisen liitteen (YM NA EN 1997-1 2018, s. 37) mukaan EQU-murtorajatilassa käytetään yhtälöä 6.10, joka on kaatavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvolle $E_{dst,d}$

$$6.10: E_{dst,d} = 1,1 \cdot G_{kj,sup} + 1,5 \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i},$$

$$(2.46)$$

ja vakauttavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvolle Estb,d

$$6.10: E_{dst,d} = 0.9 \cdot G_{kj,inf}, \tag{2.47}$$

ilman esijännitysvoimia P ja kuormakerrointa K_{FI} .

Maan lujuusparametrien osavarmuusluvut γ_M EQU-murtorajatilassa on määritetty eurokoodi 7:n Suomen kansallisissa liitteissä (LVM NA EN 1997-1 2015, s. 6; YM NA EN 1997-1 2018, s. 37). Nämä ovat melkein samat kuin eurokoodi 7:n oletusarvot (EN 1997-1 2013, s. 129). Staattisen tasapainon osoittamisen kannalta olennaisimmat lujuusparametrien osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 2.9.

Taulukko 2.9. Suomen kansallisten liitteiden mukaiset maan lujuusparametrien osavarmuusluvutEQU-murtorajatiloissa (LVM NA EN 1997-1 2015, s. 6; YM NA EN 1997-1 2018, s.

0.7.			
Parametri	Mer-	LVM	YM
	kintä		
Maan tehokas sisäinen kitkakulma	$V \varphi'$	1,25	1,25
Tehokas koheesio	γc'	1,25	1,25
Suljettu leikkauslujuus	Ycu	1,40	1,50

2.5.2 Uusi EQU-mitoitustapa

Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-1 2022, s. 58–59; prEN 1997-3 2022, s. 75, 128) mukaan rotaatiotasapainon menettämisen (engl. loss of rotational equilibrium) murtorajatila, mukaan lukien kaatuminen ilman maapohjan murtumista (engl. toppling)

mitoitetaan uuden eurokoodin liitteen A taulukoiden A.1.8 ja A.2.10 (EN 1990 2023, s. 69–71, 97–99) mukaisesti. Rotaatiotasapainon murtorajatilan estäminen osoitetaan todentamalla, että kaatavat mitoitusmomentit ovat pienempiä tai yhtä suuria kuin vakauttavat mitoitusmomentit eli kuten nykyisen eurokoodi 7:n yhtälössä (2.41), kun kuorman vaikutukset *E* ovat mitoitusmomentteja ja kun leikkauskestävyyttä $R_{EQU,d}$ ei oteta huomioon. Mikäli leikkauskestävyys otetaan huomioon, on kyseessä kaatuminen, johon liittyy maan murtuminen (engl. overturning), jolloin mitoitus tehdään kantokestävyyden kautta.

Uuden eurokoodin (EN 1990 2023, s. 59) mukaan rajatilan todentaminen vertaamalla kaatavia ja vakauttavia momentteja on sallittua vain, jos rotaatiopiste tunnetaan eli kun maan kestävyys on riittävän suuri. Rotaatiotasapainon murtorajatilassa kuormat mitoitetaan mitoitustavalla VC2, josta on kaksi osavarmuuslukusarjaa, VC2(a) ja VC2(b), joista käytetään epäedullisempaa yhdistelmää. Taulukossa 2.10 on esitetty osa VC2:n osavarmuusluvuista rakennuksille ja silloille. Seuraamuskerroin (engl. consequence factor) k_F määritetään seuraamusluokan mukaisesti ja sen arvot voidaan valita kansallisesti.

Kuorma tai kuorman vaikutus			Rakennukset		Sillat	
Тууррі		Mer- kintä	VC2(a)	VC2(b)	VC2(a)	VC2(b)
Pysyvä kuorma	epäedullinen /kaatava	γ _G	1,35 <i>k</i> ⊧	1,0	1,35 <i>k</i> ⊧	1,0
	vakauttava	γ G,stb	1,15 <i>k_F</i>	1,0	1,25 <i>k</i> _F	1,0
	edullinen	γ G,fav	1,0	1,0	1,0	1,0
Muuttuva raideliikenne- kuorma (pl. SW/2, gr16, gr17)	epäedullinen	Vo	-	-	1,45 <i>k_F</i>	1,45 <i>k</i> _F
Muuttuva tieliikennekuorma	epäedullinen	γQ	-	_	1,35 <i>k</i> ⊧	1,35 <i>k</i> ⊧
Muu muuttuva kuorma	epäedullinen		1,5k _F	1,5k _F	1,5k _F	1,5k _F
Muuttuva kuorma	edullinen	γ Q,fav	0	0	0	0

Taulukko 2.10. VC2:n kuormien osavarmuusluvut rakennuksille ja silloille (EN 1990 2023, s. 69– 71, 97–99).

Vakauttavan ja edullisen pysyvän kuorman ero määritetään yhden lähteen periaatteella (engl. single-source principle). Yhden lähteen periaatteella EQU-murtorajatilassa tarkoitetaan sitä, että samalla lähteellä voi olla sekä pysyviä epäedullisia (kaatavia) että pysyviä edullisia (vakauttavia) vaikutuksia. Näille saman lähteen pysyville edullisille kuormille käytetään vakauttavan pysyvän kuorman osavarmuuslukua $\gamma_{G,stb}$ eikä edullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku $\gamma_{G,fav}$. Esimerkiksi rakenteen tai maan omalla painolla voi olla epäedullisia ja edullisia vaikutuksia, joiden voidaan katsoa olevan yhdestä lähteestä. (EN 1990 2023, s. 51) Edellisestä voidaan huomata, että uuden eurokoodin mukaiset EQU-murtorajatilan mitoitustavan VC2 pysyvien kuormien osavarmuusluvut ja menettely eroavat selvästi nykyisestä EQU-murtorajatilan mitoitustavasta.

<u>Kuormien yhdistelmä</u> tulee laskea normaalisti vallitsevissa ja tilapäisissä murtorajatilojen mitoitustilanteissa uuden eurokoodin kaavalla 8.12 (2.26) paitsi jos kansallinen liite antaa muita vaihtoehtoja, kuten mainittiin aiemmin luvussa 2.4.1. Lisäksi Uuden eurokoodin kuormitusyhtälö 8.12 (2.26) on hyvin samanlainen kuin nykyisen eurokoodin kuormitusyhtälö 6.10 (2.8), jota käytetään nykyisen eurokoodin EQU-rajatiloissa.

<u>Yhdistelykertoimista</u> $\psi_{0,i}$ on esitetty uuden eurokoodin liitteen A osissa A.1 ja A.2 (EN 1990 2023, s. 68–69, 87–96) suositellut arvot, mutta ne ovat myös kansallisesti määritettäviä (NDP).

Maan lujuusparametrien osavarmuuslukuja γ_M EQU-murtorajatilassa ei ole määritetty uudessa eurokoodissa.

3. KANTOKESTÄVYYS

Van Baarsin (2018, s. 3) mukaan maanvaraisen perustuksen kantokestävyyden mitoittaminen oikein on usein tärkein osa rakennuksen suunnittelua. Perustuksen kantokestävyys q_u (lähteessä q_m) tarkoittaa perustuksen suurinta pohjapainetta, jolla maa ei murru. Useimmat analyyttiset kantokestävyyden ratkaisut perustuvat Prandtlin teoriaan (RIL 157-2 1990, s. 71).

3.1 Prandtlin teoria

Prandtlin teorian mukaan maa murtuu kantokestävyyden ylittyessä siten, että kiinteä maakiila perustuksen alla työntyy alaspäin ja työntää samalla maata vieressä sivulle ja ylös. Näin muodostuu yhtenäinen liukupinta *abcd* kuvan 3.1 mukaisesti. Maakiilan (vyöhyke I kuvassa) oikea kylki *ab* on suora ja kulmassa 45° + φ /2 perustuksen pohjaan nähden. Liukupinnan osa *bc* on logaritminen spiraali siten, että spiraalin säteet *r*₀ ja *r*₁ määritetään kaavoilla

$$r_0 = \frac{B}{2 \cdot \sin(45^\circ - \varphi/2)}$$
 ja (3.1)

$$r_1 = r_0 \cdot e^{\left(\frac{\mu}{2} \cdot \tan \varphi\right)},\tag{3.2}$$

joissa *B* on perustuksen pohjan pienempi sivumitta ja φ maan sisäinen kitkakulma. Spiraalin säteiden r_0 ja r_1 välinen kulma θ = 90°. Liukupinnan osa *cd* taas on suora ja kulmassa 45° - φ /2 maanpintaan nähden. (RIL 157-2 1990, s. 67–71)



Kuva 3.1. Prandtlin teorian mukainen liukupinta kantokestävyyden ylittyessä. (RIL 157-2 1990, s. 70)

Prandtlin teoriassa murtuminen perustuu Mohr–Coulombin murtokriteeriin (Van Baars 2018, s. 21). Mohr–Coulombin-murtokriteerin mukaan murtuminen tapahtuu, kun leik-kausjännitys τ_f toteuttaa yhtälön

jossa *c*' on tehokas koheesio, σ'_n on tehokas normaalijännitys murtopinnalla ja φ' on maan tehokas kitkakulma. (RIL 157-2 1990, s. 34)

Van Baarsin (2018, s. 22-23) mukaan useat tutkijat ovat vahvistaneet Prandtlin teorian mukaisen murtopinnan kokeellisesti laboratoriossa sekä numeerisin elementtimenetelmin (FEM). Kuitenkaan Briaudin (2013, s. 494) mukaan tällaista murtopintaa ei ole havaittu anturaperustuksen suuren mittakaavan kokeilla, jotka tehtiin hiekalla. Briaud toteaa (2013, s. 485–491) myös, että kuormituskokeissa karkeilla mailla, kuten soralla ja hiekalla ei muodostu selvää murtopintaa toisin kuin hienorakeisilla mailla, kuten savella. Tämä johtuu siitä, että karkeat maat ovat kuormituskokeissa avoimessa tilassa ja leikkauslujuus τ_f riippuu maan tehokkaasta normaalijännityksestä σ'_n , joka kasvaa maata kuormitettaessa, kun taas hienorakeiset maat ovat suljetussa tilassa ja leikkauslujuus c_u (lähteessä s_u) on vakio kuormituksen suhteen. Dasin (2011, s. 133– 136) mukaan taas Prandtlin teorian mukainen yhtenäisen murtopinnan (kuva 3.2a) muodostuminen ja kantokestävyyden q_u ylittyminen on yksiselitteistä vain, kun maa on tarpeeksi tiivistä. Muuten murtuminen on paikallista (kuva 3.2b) tai jopa melkein pystysuoraa (kuva 3.2c). Kuvan 3.2c murtumista kutsutaan lävistysmurtumiseksi tai läpileikkautumiseksi (engl. punching failure). Tätä käsitellään lisää luvussa 3.6.

(3.3)



Kuva 3.2. Kolme erilaista maan murtopintaa (failure surface) ja kuorman (load/unit area) suhde painumaan (settlement). (Das 2011, s. 134)

3.2 Terzaghin yleinen kantokestävyysyhtälö

Prandtlin julkaisema teoria vuonna 1920 sisälsi vain koheesion *c* vaikutuksen *c*·*N_c* kantokestävyyteen. Reissnerin julkaisu vuonna 1924 otti huomioon vaikutuksen *q*·*N_q* perustamistason mahdollisesta yläpuolisesta kuormasta *q* perustamistasolla, joka koostuu mahdollisesta perustamistason yläpuolisesta maasta ja lisäkuormasta maan pinnalla (kuva 3.1). Keverling Buismanin julkaisu vuonna 1940 otti huomioon perustamistason alapuolisen maan painon γ vaikutuksen $\frac{1}{2}\gamma$ ·*B*·*N_c*. (Van Baars 2018, s. 23)

 N_c , N_q ja N_v ovat kantavuuskertoimet koheesion, perustamistason yläpuolisen kuorman ja perustamistason alapuolisen maan painon vaikutuksille, ja B on nauhaperustuksen

leveys. Terzaghi julkaisi vuonna 1943 kantokestävyydelle q_u (lähteessä p) yleisen kantokestävyysyhtälön

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma, \tag{3.4}$$

jossa yhdistettiin näiden kolmen vaikutus kantokestävyyteen. (Van Baars 2018, s. 23)

Kantavuuskertoimien laskemiseksi on monia analyyttisia ja numeerisia ratkaisuja, joiden arvot poikkeavat toisistaan (Van Baars 2018, s. 25–37; RIL 157-2 1990, s. 70–84; Das 2011). Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 151) ja uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 270) mukaisesti kantavuuskertoimet lasketaan kaavoilla

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right), \tag{3.5}$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varphi' \text{ ja}$$
(3.6)

$$N_{\gamma} = 2(N_q + 1)\tan\varphi', \tag{3.7}$$

joissa φ ' tehokas maan sisäinen kitkakulma. Kaava (3.7) olettaa, että perustuksen pohja on karkea eli pohjan ja maan välinen kitkakulma δ toteuttaa yhtälön $\delta \ge \varphi/2$. Kaava (3.5) on sama kuin Prandtlin vuonna 1920 johtama, kaava (3.6) on sama kuin Reissnerin vuonna 1924 johtama ja kaava (3.7) on sama kuin Vesicin vuonna 1973 johtama (RIL 157-2 1990, s. 82–84).

Yhtälö (3.4) olettaa, että nämä kolme vaikutusta kantokestävyyteen ovat toisistaan riippumattomia ja niiden murtomekanismit olisivat samat eli ne voitaisiin laskea yhteen superpositioperiaatteen mukaisesti. Tämä oletus on kuitenkin väärä, koska perustamistason alapuolisen maan painoon γ perustuvan kantokestävyyden murtomekanismi ei ole sama kuin koheesioon c ja perustamistason yläpuoliseen kuormaan q perustuvat murtomekanismit. Perustamistason alapuolisen maan painoon γ aiheuttaman kantokestävyyden murtopinta ei ole kahden suoran ja niiden välissä olevan logaritmisen spiraalin yhdistelmä (kuva 3.1) kuten koheesion c ja perustamistason yläpuoliseen kuorman q aiheuttamat kantokestävyyden murtopinnat vaan ympyrä tai ellipsi (kuva 3.3). Lisäksi kantokestävyyden jakauma perustuksen alla ei ole suora vaan lähempänä kolmiota (kuva 3.3) tai hyperbeliä (kuva 3.4) huippu ylöspäin. (Van Baars 2018, s. 23, 33–37)



Kuva 3.3. Perustamistason alapuolisen maan painoon γ aiheuttaman kantokestävyyden ellipsimurtopinta ja kolmiojakauma. (Caquot & Kerisel 1966, Van Baarsin 2018, s. 33 mukaan)



Kuva 3.4. Perustamistason alapuolisen maan painoon γ aiheuttaman kantokestävyyden elementtimenetelmällä johdettu hyperbelijakauma. (Van Baarsin 2018, s. 34)

Kuitenkin useimmat myöhemmin kehitetyt ja nykyään käytössä olevat kantokestävyysyhtälöt perustuvat yhtälöön (3.4) (RIL 157-2 1990, s. 71). Myös nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 151) ja uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 65) mukainen kantokestävyysyhtälö avoimessa tilassa on samaa muotoa kuin Terzaghin yhtälö.

3.3 Kantokestävyysyhtälön oletukset, rajoitukset ja korjaukset

Terzaghin yhtälö (3.4) korjaa Prandtlin teorian virheen, että perustamistason alapuolinen maa on painotonta, ja rajoitteen, ettei perustamistason mahdollista yläpuolista kuormaa ole otettu huomioon. Prandtlin teorialla on kuitenkin muita virheitä, rajoitteita ja oletuksia, jotka on otettava huomioon käytettäessä Terzaghin yhtälöä (3.4). Terzaghin yhtälö (3.4) on johdettu oletuksin, että maa on kuivaa, ja että kitkakulma, koheesio ja maan tilavuuspaino ovat vakioita, eli maan lujuus on lineaarinen syvyyden suhteen (Briaud 2013, s. 494). Yhtälö (3.4) olettaa myös maan olevan homogeenista, isotrooppista, maanpinnan ja perustuksen pohjan olevan vaakasuora, perustuksen olevan pitkänomainen ja kuorman olevan keskeistä ja pystysuoraa. Lisäksi yhtälö (3.4) ei ota huomioon perustamistason yläpuolisen maan lujuutta, vaan olettaa murtopinnan vain perustuksia. (RIL 157-2 1990, s. 71–84)

3.3.1 Muotokertoimet perustukselle

Yhtälössä (3.4) perustuksen pohjan oletetaan olevan suorakaide ja pitkänomainen eli leveyden *B* suhde pituuteen *L* lähenee nollaa (Das 2011, s. 136). Kun lasketaan kantokestävyyttä muun muotoiselle perustukselle, kantokestävyysyhtälön (3.4) jokaista kolmea termiä korjataan omalla muotokertoimella s_c , s_q , ja s_γ (RIL 157-2 1990, s. 76).

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 151) ja uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 270) informatiivisten liitteiden ehdottamat kaavat suorakaiteen ja ympyrän muotoisten perustusten muotokertoimille ovat identtiset. Nämä kaavat ovat

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1},\tag{3.8}$$

$$s_q = 1 + \frac{B'}{t'} \sin \varphi' \text{ ja}$$
(3.9)

$$s_{\gamma} = 1 - 0.3 \frac{B'}{L'},\tag{3.10}$$

joissa tehokas perustuksen pohjan leveys B' ja tehokas perustuksen pohjan pituus L' lasketaan eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 152) ja uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 63) mukaisesti kaavoilla

$$B' = B - 2e_B \text{ ja} \tag{3.11}$$

$$L' = L - 2e_L, \tag{3.12}$$

joissa e_B on perustukseen kohdistuvan kuormien resultanttivoiman epäkeskisyys eli etäisyys perustuksen pohjan keskipisteestä leveyden *B* suunnassa ja e_L on resultanttivoiman epäkeskisyys pituuden *L* suunnassa. Kuvassa 3.5 on havainnollistettu kaavojen (3.11) ja (3.12) mittoja suorakaiteisella perustuksella.



Kuva 3.5. Perustuksen pohjan mitat A', B', L', B, L, e_B ja e_L havainnollistettuna. (prEN 1997-3 2022, s. 64)

3.3.2 Kuorman vinous

Yhtälössä (3.4) perustukseen kohdistuvan kuormaresultantin oletetaan olevan pystysuora (RIL 157-2 1990, s. 72–73). Perustukseen kohdistuva vaakasuora lisäkuorma vähentää merkittävästi pystysuoraa kantokestävyyttä (Van Baars 2018, s. 44). Vinon kuorman tapauksessa kantokestävyysyhtälön (3.4) jokaista kolmea termiä kerrotaan omalla kuormakaltevuuskertoimella i_c , i_q , ja i_γ . Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 270) informatiivisen liitteen mukaiset kertoimet ovat

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \tan \varphi'} = \frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1},$$
(3.13)

$$i_q = \left(1 - \frac{T}{N}\right)^m ja \tag{3.14}$$

$$i_{\gamma} = \left(1 - \frac{T}{N}\right)^{m+1},\tag{3.15}$$

joissa T ja N ovat tangentiaalisesti ja kohtisuoraan perustuksen pohjaan kohdistuvat resultanttivoimat. Eksponentti m kaavoissa (3.14) ja (3.15) lasketaan kaavalla

$$m = m_B = \frac{2 + (B'/L')}{1 + (B'/L')},$$
(3.16)

jos T on B':n suuntainen, kaavalla

$$m = m_B = \frac{2 + (L'/B')}{1 + (L'/B')},$$
(3.17)

jos T on L':n suuntainen, ja kaavalla

$$m = m_{\theta} = m_L \cos^2 \theta + m_B \sin^2 \theta, \qquad (3.18)$$

jos *T* on muun suuntainen. Kulma θ on kulma *L*':n ja *T*:n välillä. Voidaan huomata, että jos tehokas koheesio *c*' = 0, niin uuden eurokoodi 7:n luonnoksen kaavat (3.14) ja (3.15) vastaavat nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 152) informatiivisen liitteen esimerkkikaavoja

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + A'c'\cot\varphi'}\right)^m ja$$
(3.19)

$$i_{\gamma} = \left(1 - \frac{H}{V + A'c'\cot\varphi'}\right)^{m+1},\tag{3.20}$$

joissa H = T, V = N ja m lasketaan kaavoilla (3.16), (3.17) ja (3.18). Van Baarsin (2018, s. 45) mukaan kuormakaltevuuskertoimien eivät voi edes riippua koheesiosta, joten on perusteltua käyttää uuden eurokoodin mukaisia kaavoja (3.14) ja (3.15), vaikka tehokas koheesio *c*' ei olisi 0. Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen kaava (3.13) on sama kuin nykyisessä eurokoodi 7:ssä. Perustuksen pohjan tehokas pinta-ala *A*' lasketaan suorakaiteiselle perustukselle kaavalla

$$A' = B' \cdot L'. \tag{3.21}$$

3.3.3 Vedellä kyllästynyt maa avoimessa tilassa

Avoimessa tilassa huokosvedenpaine *u* pysyy vakiona, koska maan kuormitus tapahtuu niin hitaasti, että huokosvesi ehtii purkautumaan pois kuormitetusta maasta. Purkautumisen nopeus riippuu maan vedenläpäisevyydestä. (Knappett & Craig 2020, s. 80–81). Vedellä kyllästyneessä maassa, kuten pohjavedenpinnan alapuolella tehokas normaalijännitys σ'_n on

$$\sigma'_n = \sigma_n - u, \tag{3.22}$$

jossa *u* on huokosvedenpaine ja σ_n on kokonaisnormaalijännitys (Briaud 2013, s. 253).

Terzaghin yhtälö (3.4) olettaa maan olevan kuivaa. Tällöin yhtälöä voi käyttää avoimessa tilassa tehokkailla jännitysparametreillä eli tehokkaalla koheesiolla *c*' ja tehokkaalla kitkakulmalla φ ', jolloin yhtälö (3.4) antaa pitkäaikaisen kantokestävyyden hienorakeisille maille ja lyhytaikaisen ja pitkäaikaisen kantokestävyyden karkearakeisille maille. (Briaud 2013, s. 494–495)

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 151) mukaan laskettaessa kantokestävyyttä analyyttisellä menetelmällä otetaan huomioon pohjavedenpaineet ja avoimessa tilassa käytetään perustamistason yläpuolisen maan aiheuttamaa tehokasta kuormaa q' kuorman q sijaan ja perustustason alapuoliselle maalle tehokasta tilavuuspainoa γ' tilavuuspainon γ sijaan. Pohjavedenpinnan alapuolella tehokas tilavuuspaino eli maan paino ilman huokosvettä γ' lasketaan pohjavedenpinnan alapuolella

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w, \tag{3.23}$$

jossa γ_{sat} on vedellä täysin kyllästetyn maan tilavuuspaino ja γ_w = 9,81 kN/m³ on veden tilavuuspaino. (Briaud 2013, s. 31–32)

Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen informatiivisen liitteen (prEN 1997-3 2022, s. 271) mukaan maan ollessa täysin vedellä kyllästynyt ja ilman suotovirtausta voidaan q' ja γ' laskea seuraavasti.

Jos pohjavedenpinta on maanpinnan tasolla, q' lasketaan kaavalla

$$q' = (\gamma_{sat} - \gamma_w)D, \tag{3.24}$$

jossa D on perustamistason syvyys maanpinnasta.

Jos pohjavedenpinta on syvyydellä D_w maanpinnasta mutta perustamistason yläpuolella, q' lasketaan kaavalla

$$q' = \gamma D_w + (\gamma_{sat} - \gamma_w)(D - D_w),$$
(3.25)

jossa γ on maan tilavuuspaino pohjavedenpinnan yläpuolella.

Jos pohjavedenpinta on perustamistasolla tai sen alapuolella, q' lasketaan kaavalla

$$q' = \gamma D. \tag{3.26}$$

Tehokas tilavuuspaino γ' lasketaan kaavalla

$$\gamma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w), \tag{3.27}$$

jos pohjavedenpinta on alle 1,5·B syvyydellä perustamistasosta, ja kaavalla

$$\gamma' = \gamma, \tag{3.28}$$

jos pohjavedenpinta on yli 1,5·B syvyydellä perustamistasosta.

Uuden eurokoodi 7:n luonnoksessa (prEN 1997-3 2022, s. 271) kaavojen (3.24), (3.25) ja (3.27) ($\gamma_{sat} - \gamma_w$) -termit on kirjoitettu ($\gamma - \gamma_w$), mutta kirjallisuuden (Das 2011, s. 142; RIL 157-2 1990, s. 73) perusteella on selvää, että oikea termi on ($\gamma_{sat} - \gamma_w$).

Lisäksi, jos pohjanvedenpinta on $d \le B$ verran perustamistason alapuolella kirjallisuuden mukaan (Das 2011, s. 142; RIL 157-2 1990, s. 73) tehokas tilavuuspaino γ ' lasketaan kaavalla

$$\gamma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w) + \frac{z_w}{B} \left(\gamma - (\gamma_{sat} - \gamma_w) \right), \tag{3.29}$$

jossa z_w on siis pohjavedenpinnan syvyys perustamistasosta.

3.3.4 Perustamistason yläpuolisen maan lujuus

Terzaghin yhtälö (3.4) ei ota huomioon mahdollista perustamistason yläpuolisen maan lujuutta, pelkästään sen painon. Prandtlin teorian murtomallista poikkeavissa Meyerhofin vanhan teorian ja Ballan teorian murtomalleissa liukupinta ulottuu maanpinnalle asti. Kuitenkin perustamistason yläpuolisen maan lujuus voidaan ottaa huomioon kertomalla kantokestävyysyhtälön (3.4) jokaista kolmea termiä omalla syvyyskertoimella d_c , d_q , ja d_γ . (RIL 157-2 1990, s. 76–82)

Nykyisen eurokoodi 7:n kantokestävyyskaavassa (EN 1997-1 2013, s. 151) syvyyskertoimia ei ole, mutta uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 271) mukaan ne voidaan laskea kaavoilla

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \tan \varphi'},$$
(3.30)

$$d_q = 1 + 2 \tan \varphi' (1 - \sin \varphi')^2 (D/B), \operatorname{kun} D/B \le 1,0,$$
(3.31)

$$d_q = 1 + 2 \tan \varphi' (1 - \sin \varphi')^2 \tan^{-1}(D/B), \operatorname{kun} D/B > 1,0 \text{ ja}$$
(3.32)

$$d_{\gamma} = 1. \tag{3.33}$$

Jos maan lujuus perustamistason yläpuolella on pienempi kuin perustamistasolla, syvyyskertoimina pitää käyttää $d_c = d_q = d_\gamma = 1,0$. Myöskään nykyistä eurokoodi 7:ä koskeva Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohje (NCCI 7 2023, s. 45) ei käytä syvyyskertoimia eivätkä nykyisen eurokoodi 7:n suomalaiset kansalliset liitteet (LVM NA EN 1997-1 2015;YM NA EN 1997-1 2018) ota asiaan kantaa.

3.3.5 Maanpinnan kaltevuus

Terzaghin yhtälö (3.4) olettaa maanpinnan olevan vaakasuora. Jos perustus on maassa, jonka pinta on kalteva, perustuksen kantokestävyys on pienempi. Maanpinnan kaltevuus β voidaan ottaa huomioon kertomalla kantokestävyysyhtälön (3.4) jokaista kolmea termiä omalla maanpinnan kaltevuuskertoimella g_c , g_q , ja g_{γ} . (RIL 157-2 1990, s. 75)

Nykyisen eurokoodi 7:n opastavan liitteen (EN 1997-1 2013, s. 151) mukaan maanpinnan kaltevuus otetaan huomioon laskettaessa kantokestävyyttä, mutta ei kerrota, miten se tulisi tehdä. Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeessa (NCCI 7 2023, s. 46–47) kaltevuus otetaan huomioon kertomalla koko käytettävää kantokestävyysyhtälöä maanpinnan kaltevuuskertoimella *g*, joka lasketaan kaavalla

$$g = (1 - 0.5 \tan \beta)^5$$
,

(3.34)

jossa maanpinnan kaltevuus β on joko kuvan 3.6 mukainen β_1 , jolloin perustamistason syvyys *D* mitataan kuvan mukaisesti perustuksen reunasta, tai kuvan 3.7 mukainen β_2 , jolloin perustamistason syvyys on *D* = 0. Valinta riippuu siitä, kummalla tavalla kantokestävyydestä tulee suurempi.



Kuva 3.6. Kaltevuus β₁, kun perustamistason syvyys D mitataan perustuksen reunasta. (NCCI 7 2023, s. 47)





$$g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_c \tan \varphi'} = \frac{g_q N_q - 1}{N_q - 1} ja$$
(3.35)

$$g_q = g_\gamma = (1 - \tan \beta)^2,$$
 (3.36)

jossa maan kaltevuus β mitataan perustamistasosta alaspäin (" β is the inclination of the ground surface, downwards from the edge of the foundation").

3.3.6 Perustuksen pohjan kaltevuus

Terzaghin yhtälö (3.4) olettaa perustuksen pohjan olevan vaakasuora. Kaltevasta perustuksen pohjasta voi kuitenkin olla hyötyä, kun perustukseen kohdistuu suuria vaakakuomia. Perustuksen pohjan kaltevuus α (radiaaneissa) voidaan ottaa huomioon

kertomalla kantokestävyysyhtälön (3.4) jokaista kolmea termiä omalla pohjakaltevuuskertoimella b_c , b_q , ja b_{γ} . (RIL 157-2 1990, s. 75–76)

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 151) ja uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 270) informatiivisten liitteiden ehdottamat kaavat pohjakaltevuuskertoimille ovat identtiset. Nämä kaavat ovat

$$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \tan \varphi'} ja$$
(3.37)

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \tan \varphi')^2,$$
 (3.38)

3.3.7 Maan kerroksellisuus

Terzaghin yhtälö (3.4) olettaa maan olevan homogeenista ja isotrooppista, ja kitkakulma, koheesio ja maan tilavuuspaino oletetaan vakioiksi (Das 2011, s. 190). Sekä nykyinen eurokoodi 7 (EN 1997-1 2013, s. 61) että uuden eurokoodi 7:n luonnos (prEN 1997-3 2022, s. 66) toteavat, että laskettaessa kantokestävyyttä murtumismekanismin ja valittujen leikkauslujuus- ja muodonmuutosparametrien on otettava huomioon mahdollinen maan kerroksellisuus tai muu epäjatkuvuus.

Uuden eurokoodi 7:n luonnoksessa (prEN 1997-3 2022, s. 66) kehotetaan vahvasti, että sen kantokestävyyskaavaa (3.39), joka perustuu Terzaghin yhtälöön (3.4), ei pidä käyttää, mikäli kantokestävyysmurtuman vaikutusalueella maakerrosten lujuusominaisuudet poikkeavat yli 5 % toisistaan. Kerroksellisille maille on kehitetty kantokestävyysyhtälöitä tietyille tapauksille (Das 2011, s. 190–200). Luvussa 3.6 käsitellään tarkemmin yhtä kerroksellista tapausta: luja karkearakeinen maakerros pehmeän hienorakeisen maan päällä.

3.4 Eurokoodi 7:n kantokestävyysyhtälö avoimessa tilassa

Uuden eurokoodi 7:n luonnoksessa (prEN 1997-3 2022, s. 63–66) määritetään avoimen tilan (ks. luku 3.3.3) kantokestävyys perustuksen pohjaan kohtisuoraan kohdistuvana resultanttivoimana R_N perustuksen suurimman pohjapaineen q_u sijaan. Kantokestävyyden resultanttivoima R_N lasketaan kaavalla

$$R_{N} = A'(c'N_{c}b_{c}d_{c}g_{c}i_{c}s_{c} + q'N_{q}b_{q}d_{q}g_{q}i_{q}s_{q} + 0.5\gamma'B'N_{\gamma}b_{\gamma}d_{\gamma}g_{\gamma}i_{\gamma}s_{\gamma}),$$
(3.39)

jossa perustuksen pohjan tehokas pinta-ala *A'* lasketaan suorakaiteiselle perustukselle kuvan 3.5 mukaisesti kaavalla

$$A' = B' \times L'. \tag{3.40}$$

Kantokestävyyden resultanttivoiman R_N yksikkö on siis kaavan (3.39) tapauksessa kN. Jatkuvalle suoralle nauhaperustukselle voidaan laskea kantokestävyysvoima per metri käyttämällä kaavassa (3.39) tehokkaan pinta-alan A' sijaan tehokasta leveyttä B' eli kaava (3.39) saa silloin muodon

$$R_{N} = B'(c'N_{c}b_{c}d_{c}g_{c}i_{c}s_{c} + q'N_{q}b_{q}d_{q}g_{q}i_{q}s_{q} + 0.5\gamma'B'N_{\gamma}b_{\gamma}d_{\gamma}g_{\gamma}i_{\gamma}s_{\gamma}),$$
(3.41)

jolloin kantokestävyyden resultanttivoiman R_N yksikkö on siis kaavan (3.41) tapauksessa kN/m.

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 151) mukaan kantokestävyys lasketaan avoimessa tilassa kaavalla

$$R/A' = c'N_c b_c s_c i_c + q'N_q b_q s_q i_q + 0.5\gamma' B'N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma,$$

$$(3.42)$$

joten nykyisen eurokoodi 7:n ja uuden eurokoodi 7:n luonnoksen kantokestävyyskaavat (3.39) ja (3.42) ovat identtiset kertoimineen, kun kaikki seuraavat ehdot täyttyvät:

- 1) ei käytetä syvyyskertoimia d_c , d_q , ja d_{γ} ,
- 2) ei käytetä maanpinnan kaltevuuskertoimia g_c , g_q , ja g_γ ja
- 3) tehokas koheesio on c' = 0 (ks. luku 3.3.2).

3.5 Eurokoodi 7:n kantokestävyysyhtälö suljetussa tilassa

Suljettu tila tarkoittaa, että maan kuormitus tapahtuu niin nopeasti, ettei huokosvesi ehdi purkautumaan pois kuormitetusta maasta. Kun huokosvesi ei purkaudu, huokosvedenpaine *u* kasvaa kokonaisnormaalijännityksen σ_n kasvaessa. Koska huokosvedenpaine ei ole vakio, tehokasta normaalijännitystä σ'_n on vaikea määrittää. (Briaud 2013, s. 454–455)

Suljetussa tilassa on siis vaikea käyttää Mohr–Coulombin murtokriteeriin (3.3) perustuvaa Terzaghin yhtälöä (3.4) tai sen johdannaisia. Briaudin (2013, s. 495) mukaan lyhytaikaisen kantokestävyyden laskemiseksi hienorakeiselle maalle voikin käyttää suljettuun leikkauslujuuteen c_u perustuvaa kantokestävyysyhtälöä (Briaud 2013, s. 492).

Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 63–66) mukaan suljetussa tilassa voidaan käyttää suljettuun leikkauslujuuteen *c*^{*u*} perustuvaa kantokestävyysyhtälöä

$$R_{Nu} = A'(c_u N_{cu} b_{cu} d_{cu} g_{cu} i_{cu} s_{cu} + q),$$
(3.43)

jossa R_{Nu} on siis perustuksen pohjaan kohtisuoraan kohdistuvan resultanttivoima. Jatkuvalle suoralle nauhaperustukselle voidaan laskea kantokestävyysvoima per metri käyttämällä kaavassa (3.43) tehokkaan pinta-alan A' sijaan tehokasta leveyttä B' eli kaava (3.43) saa silloin muodon

$$R_{Nu} = B'(c_u N_{cu} b_{cu} d_{cu} g_{cu} i_{cu} s_{cu} + q), aga{3.44}$$

jolloin kantokestävyyden resultanttivoiman R_{Nu} yksikkö on siis kaavan (3.44) tapauksessa kN/m. Kantavuuskerroin suljetussa tilassa N_{cu} lasketaan kaavalla

$$N_{cu} = (\pi + 2). \tag{3.45}$$

Pohjakaltevuuskerroin suljetussa tilassa *b*_{cu} lasketaan kaavalla

$$b_{cu} = 1 - \frac{2\alpha}{\pi + 2}.$$
 (3.46)

Syvyyskerroin suljetussa tilassa *d*_{cu} lasketaan kaavalla

$$d_{cu} = 1 + 0.33 \tan^{-1}(D/B). \tag{3.47}$$

Maanpinnan kaltevuuskerroin suljetussa tilassa g_{cu} lasketaan kaavalla

$$g_{cu} = 1 - \frac{2\beta}{\pi + 2} \ge 0. \tag{3.48}$$

Kuormakaltevuuskerroin suljetussa tilassa *icu* lasketaan kaavalla

$$i_{cu} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{T}{A'c_u}} \right), T \le A'c_u.$$
(3.49)

Muotokerroin suljetussa tilassa s_{cu} suorakaiteiselle perustukselle lasketaan kaavalla

$$s_{cu} = 1 + 0.2 \frac{B'}{L'}.$$
(3.50)

Nykyisen eurokoodi 7:n (EN 1997-1 2013, s. 151) mukaan kantokestävyys lasketaan suljetussa tilassa kaavalla

$$R/A' = (\pi + 2)c_u b_{cu} i_{cu} s_{cu} + q,$$
(3.51)

joten nykyisen eurokoodi 7:n ja uuden eurokoodi 7:n luonnoksen kantokestävyyskaavat (3.39) ja (3.51) ovat identtiset kertoimineen, kun ei käytetä syvyyskerrointa d_{cu} eikä maanpinnan kaltevuuskerrointa g_{cu} .

3.6 Lävistysmurto

Kuten todettiin aiemmin luvussa 3.3, Terzaghin kantokestävyysyhtälö (3.4) tai siihen perustuva eurokoodi 7:n kantokestävyysyhtälö (3.39) eivät päde välttämättä kerroksellisilla mailla. Tämän työn nosturin tukijalan laskentatapauksissa (luku 4.3) vertaillaan nykyisen eurokoodi 7:n ja uuden eurokoodi 7:n luonnoksen mitoitustapoja kantokestävyydelle pehmeällä hienorakeisella maalla, jonka päälle on rakennettu karkearakeinen tiivis täyttö, jonka päälle nosturin tukijalka perustetaan. Sekä nykyinen eurokoodi 7 (EN 1997-1 2013, s. 61) että uuden eurokoodi 7:n luonnos (prEN 1997-3 2022, s. 66) toteavat, että jos vahvemman maakerroksen alla on heikompi maakerros, on tarkistettava lävistysmurto vahvemman maakerroksen läpi ja alemman maakerroksen kantokestävyyden ylittyminen.

3.6.1 Lävistysmurto yleisesti

Briaudin (2013, s. 496–498) ja Dasin (2011, s. 190–197) mukaan nauhaperustuksen tapauksessa, jossa on kantavuudeltaan vahvempi maakerros heikomman maakerroksen päällä, riippuu murtomekanismi vahvan maakerroksen paksuudesta. Kun vahva maakerros perustuksen alla on tarpeeksi paksu, tapahtuu murtuminen pelkästään vahvassa maakerroksessa kuvan 3.8b mukaisesti, ja perustuksen kantokestävyys lasketaan vahvasta maakerroksesta niin kuin heikkoa maakerrosta ei olisi alla ollenkaan. Kun vahvan maakerroksen paksuus perustuksen alla D_1 (lähteissä H) on mitätön suhteessa perustuksen leveyteen B, perustuksen kantokestävyys lasketaan heikosta maakerroksesta niin kuin vahvaa maakerrosta ei olisi ollenkaan. Kun vahvan maakerroksen paksuus perustuksen kantokestävyys lasketaan heikosta maakerroksen paksuus perustuksen alla D_1 ei ole liian paksu eikä liian ohut, murtuminen tapahtuu siten, että perustus lävistyy suoraan kuvan 3.8a mukaisesti vahvan maakerroksen läpi. Tätä kutsutaan lävistysmurtumaksi tai lävistysmurroksi (engl. punching failure).

Lävistysmurrossa, kun perustuksen pohja on syvyydellä *D* (kuva 3.8a), kantokestävyyden q_u pystysuuntainen tasapainoyhtälö nauhaperustuksen pohjassa on Dasin (2011, s. 190–197) mukaan

$$q_u = q_b + \frac{2(c_a + P_p \sin \delta')}{B} - \gamma_1 D_1,$$
(3.52)

jossa q_b on alemman kerroksen kantokestävyys, γ_1 on ylemmän maakerroksen tilavuuspaino, C_a on adheesiovoima, P_p on passiivimaanpaineen resultanttivoima kuvan 3.8a pinnoilla *aa*' ja *bb*' ja δ ' on P_p :n kulma vaakatasoon nähden. Adheesiovoima C_a lasketaan kaavalla

$$C_a = c_a' D_1, \tag{3.53}$$

jossa c'a on adheesio.





Yhtälö (3.52) voidaan Dasin (2011, s. 190–197) mukaan kirjoittaa muodossa

$$q_u = q_b + \frac{2c'_a D_1}{B} + \gamma_1 D_1^2 \left(1 + \frac{2D}{D_1}\right) \frac{K_{pH} \tan \delta'}{B} - \gamma_1 D_1,$$
(3.54)

jossa c'_a on adheesio ja K_{pH} on passiivipainekertoimen vaakakomponentti. Toisaalta yhtälö (3.54) voidaan kirjoittaa tehokkaan ylemmän maakerroksen sisäisen kitkakulman φ'_1 avulla muodossa

$$q_u = q_b + \frac{2c'_a D_1}{B} + \gamma_1 D_1^2 \left(1 + \frac{2D}{D_1}\right) \frac{K_{ps} \tan \varphi_1'}{B} - \gamma_1 D_1,$$
(3.55)

kun

$$K_{pH}\tan\delta' = K_{ps}\tan\varphi_1',\tag{3.56}$$

jossa $K_{\rho s}$ (lähteessä K_s) on lävistysleikkauskerroin, joka on kantokestävyyssuhteen q_2/q_1 :n ja kitkakulman φ'_1 :n funktio

$$K_{ps} = f\left(\frac{q_2}{q_1}, \varphi_1'\right),\tag{3.57}$$

jossa q_1 on nauhaperustuksen kantokestävyys ylemmän maakerroksen pinnalla, kun ei oteta alempaa kerrosta huomioon. Kantokestävyys q_2 on vastaavasti nauhaperustuksen kantokestävyys alemman maakerroksen pinnalla, kun ei oteta ylempää kerrosta huomioon. Toisin sanoen molemmat kantokestävyydet lasketaan ilman perustamistason yläpuolista kuormaa q. Lävistysleikkauskerroin K_{ps} voidaan määrittää Meyerhofin & Hannan (1978, s. 566) nomogrammista (kuva 3.9) kantokestävyyssuhteen q_2/q_1 ja tehokkaan maan sisäisen kitkakulman φ ' perusteella.



Kuva 3.9. Nomogrammi lävistysleikkauskertoimen K_{ps} (kuvassa K_s) määrittämiseen kantokestävyyssuhteen q₂/q₁ ja tehokkaan maan sisäisen kitkakulman φ' perusteella (Meyerhof & Hanna 1978, s. 566).

Suorakaiteiselle perustukselle kantokestävyys lasketaan Dasin (2011, s. 193) mukaan siten, että yhtälöön (3.55) lisätään korjauskerroin (1+*B*/*L*) adheesion ja passiivimaanpaineen termeihin, joten yhtälö saa muodon

$$q_u = q_b + \left(1 + \frac{B}{L}\right) \frac{2c'_a D_1}{B} + \gamma_1 D_1^2 \left(1 + \frac{B}{L}\right) \left(1 + \frac{2D}{D_1}\right) \frac{K_{ps} \tan \varphi'_1}{B} - \gamma_1 D_1.$$
(3.58)

Lisäksi yhtälön (3.55) antama kantokestävyys on enintään yhtä suuri kuin ylemmän kerroksen kantokestävyys q_t , koska muuten murtuminen tapahtuu kuvan 3.8b mukaisesti vain ylemmässä kerroksessa. Kuitenkin ylemmän kerroksen paksuuden D_1 on oltava tarpeeksi suuri, että murtopinta mahtuu kokonaan siihen.

Yhtälöt (3.52), (3.54), (3.55) ja (3.58) pätevät vain pystysuorasti kuormitetulle perustukselle. Meyerhof & Hanna (1978) on kehittänyt ratkaisun myös vinosti kuormitetulle perustukselle. Tässä työssä lävistysmurtoa tutkitaan kuitenkin vain pystysuorasti kuormitettuna. Uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 273–274) esittämä kantokestävyysyhtälö ei myöskään ota huomioon kuormituksen vinoutta.

3.6.2 Karkearakeinen täyttö pehmeän saven päällä

Kun vahva hiekkakerros on täysin vedellä kyllästyneen pehmeän saven päällä, Dasin (2011, s. 194) mukaan alemman kerroksen kantokestävyys q_b lasketaan kaavalla

$$q_b = \left(1 + 0.2\frac{B}{L}\right) 5.14c_{u2} + \gamma_1 (D + D_1), \tag{3.59}$$

ja ylemmän kerroksen kantokestävyys qt lasketaan kaavalla

$$q_t = \gamma_1 D N_{q1} s_{q1} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma 1} s_{\gamma 1}, \tag{3.60}$$

joissa c_{u2} on alemman kerroksen suljettu leikkauslujuus, N_{q1} ja $N_{\gamma1}$ ovat ylemmän maakerroksen kantavuuskertoimet ja s_{q1} ja $s_{\gamma1}$ ovat ylemmän maakerroksen muotokertoimet. Yhtälöiden (3.58) ja (3.59) perusteella kantokestävyys vahvalla hiekkakerroksella ($c'_a = 0$), joka on täysin vedellä kyllästyneen pehmeän saven päällä, on siis

$$q_{u} = \left(1 + 0.2\frac{B}{L}\right) 5.14c_{u2} + \gamma_{1}D_{1}^{2}\left(1 + \frac{B}{L}\right) \left(1 + \frac{2D}{D_{1}}\right) \frac{K_{ps}\tan\varphi_{1}'}{B} + \gamma_{1}D \le q_{t}.$$
(3.61)

Lävistysleikkauskertoimen $K_{\rho s}$ ratkaisemiseksi tarvittava kantokestävyyssuhde q_2/q_1 lasketaan kaavalla

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{5.14c_{u2}}{\frac{1}{2}\gamma_1 B N_{\gamma_1}}.$$
(3.62)

Briaud (2013, s. 497–498) esittää myös yhtälöä (3.61) vastaavan kaavan vahvalle hiekalle pehmeän saven päällä, mutta nauhaperustukselle (B/L = 0) maanpinnalla (D = 0).

Briaud (2013, s. 497–498) ja Das (2011, s. 194) esittävät kaavansa vahvalle hiekalle pehmeän saven päällä, mutta uuden eurokoodi 7:n luonnos (prEN 1997-3 2022, s. 274)

käyttää vastaavaa kaavaa kuin (3.61) yleisemmin vahvalle karkearakeiselle maalle heikon hienorakeisen maan päällä, joten kaavan (3.61) voi olettaa käyttökelpoiseksi pehmeällä hienorakeisella maalla, jonka päälle on rakennettu karkearakeinen tiivis täyttö.

Uuden eurokoodin luonnoksessa (prEN 1997-3 2022, s. 274) on määritetty suorakaiteisen perustuksen, joka on perustettu vahvaan karkearakeiseen maakerrokseen, jonka alla on heikko hienorakeinen maakerros, kantokestävyyden resultanttivoiman R_{Nu} kaava

$$R_{Nu} = A \left(1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) (\pi + 2) c_{u2} + A' \gamma_1' D_1^2 \left(1 + \frac{2D}{D_1} \right) \frac{K_{ps} \tan \varphi_1'}{B} + A' \gamma_1 D,$$
(3.63)

jossa γ'_1 on ylemmän maakerroksen tehokas tilavuuspaino. Lävistysleikkauskertoimen K_{ps} ratkaisemiseksi tarvittava kantokestävyyssuhde q_2/q_1 lasketaan kaavalla

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{(\pi + 2)c_{u2}}{\frac{1}{2}\gamma_1' B N_{\gamma_1}}.$$
(3.64)

Uuden eurokoodin luonnoksen kaavassa (3.63) ei siis ole suorakaiteisen perustuksen muotokerrointa (1+B/L) keskimmäisessä termissä kuten Dasin kaavassa (3.61). Muotokertoimen käyttö voidaan perustella suuremmalla lävistyksen leikkauspinnan (kuvassa 3.8a pinnat *aa*' ja *bb*') suhteella perustuksen pohjan pinta-alaan kuin nauhaperustuksessa. Lisäksi myös Meyerhof & Hanna (1978, s. 567, kaava [5]) käyttää muotokerrointa ympyrämuotoiselle perustukselle samassa termissä. Tämän takia suorakaiteisen perustuksen, joka on perustettu vahvaan karkearakeiseen maakerrokseen, jonka alla on heikko hienorakeinen maakerros, kantokestävyyden resultanttivoima R_{Nu} voidaan laskea kaavalla

$$R_{Nu} = A \left(1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) (\pi + 2) c_{u2} + A' \gamma_1' D_1^2 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(1 + \frac{2D}{D_1} \right) \frac{K_{ps} \tan \varphi_1'}{B} + A' \gamma_1 D.$$
(3.65)

Lisäksi, koska yhtälön (3.61) mukaan $q_u \le q_t$, kaavalle (3.65) pätee, että $R_{Nu} \le R_{Nt}$, joka on ylemmän kerroksen kantokestävyyden q_t resultanttivoima eli

$$R_{Nt} = \gamma_1' D N_{q1} s_{q1} + \frac{1}{2} \gamma_1' B N_{\gamma 1} s_{\gamma 1}, \tag{3.66}$$

jonka kantavuuskertoimet N_{q1} ja $N_{\gamma1}$ lasketaan kaavoilla (3.5) ja (3.6) ja muotokertoimet s_{q1} ja $s_{\gamma1}$ lasketaan kaavoilla (3.9) ja (3.10). Mikäli R_{Nu} on suurempi kuin R_{Nt} on tarkistettava, että kaavan (3.66) mukainen murtopinta on kokonaan ylemmässä maakerroksessa kuvan 3.8b mukaisesti. Uudessa eurokoodi 7:n (prEN 1997-3 2022, s. 271–272) luonnoksessa on esitetty tapa määrittää murtovyöhykkeen syvyys perustuksen pohjasta z_e (kuva 3.10) nomogrammista (kuva 3.11) horisontaali- ja

vertikaalikuormien suhteen *H/V* (tässä työssä *H/V* = 0) ja tehokkaan maan sisäisen kitkakulman ominaisarvon φ_{k} :n perusteella.



Kuva 3.10. Murtovyöhykkeen syvyyttä z_e havainnollistava kuva. (prEN 1997-3 2022, s. 272)



Kuva 3.11. Nomogrammi murtovyöhykkeen syvyyden z_e määrittämiseen horisontaalija vertikaalikuormien suhteen H/V ja tehokkaan maan sisäisen kitkakulman ominaisarvon φ'_k:n perusteella. (prEN 1997-3 2022, s. 272)

3.7 Kulmatukimuurin kantokestävyys ja maanpaine

Briaudin (2013, s. 728) mukaan kulmatukimuurin kantokestävyys mitoitetaan kuten maanvarainen perustus. Sekä nykyinen eurokoodi 7 että uuden eurokoodi 7:n luonnos määräävät kulmatukimuurin kantokestävyyden ja liukumisvarmuuden mitoituksen osalta käytettävän samoja määräyksiä ja ohjeita kuin antura- ja laattaperustuksilla (EN 1997-1 2013, s. 94, 101; prEN 1997-3 2022, s. 128).

Kulmatukimuuri ja sen taustatäyttö eli maa, joka on kulmatukimuurin kannan päällä, oletetaan mitoituksessa jäykäksi kappaleeksi. Kuvassa 3.12 on esitetty periaatekuva kulmatukimuurin murtopinnasta ja kuormista. Tämän jäykän kappaleen oletetaan kantokestävyyden ylittyessä työntävän yhtenä kappaleena alla olevaa maakiilaa (kuvassa 3.12 vyöhyke I), joka työntää Prandtlin teorian mukaisesti viereistä maata kohti kulmatukimuurin etupuolta ja ylös. Näin muodostuu yhtenäinen liukupinta kulmatukimuurin kannan takareunasta (kuvassa 3.12 "Heel") kulmatukimuurin etupuolelle kulmatukimuurin pohjan tasoon asti. Maakiilaan kohdistuva kuorma N_k on kulmatukimuurin painon W ja sen taustatäytön painon W_s ja mahdollisten kulmatukimuurin suoraan yläpuolella olevien kuormien summa.

Kulmatukimuuriin kohdistuu tuettavasta maasta johtuva pysyvä vaakakuorma (maanpaineesta) *P*. Yleensä murtorajatilojen laskenta yksinkertaistetaan (Bond 2008, s. 359; Das 2011, s. 378–379; Knappett & Craig 2020, s. 478–485) siten, että tämä maanpaine kohdistuu kulmatukimuurin ja sen taustatäytön muodostamaan jäykäksi oletettuun kappaleeseen, joka rajautuu ns. virtuaalipintaan (engl. virtual plane). Virtuaalipinta kulkee kulmatukimuurin kannan takareunasta maanpintaan (katkoviiva kuvassa 3.12).



Kuva 3.12. Periaatekuva kulmatukimuurin murtopinta ja kuormat (perustuu lähteisiin Knappett & Craig 2020, s. 478 ja RIL 157-2 1990, s. 70).

Maanpaineen resultantin *P* laskemiseen on eri lähteissä käytetty aktiivipainetta tai lepopainetta. Useat lähteet (Bond 2008, s. 359; Das 2011, s. 378–379; Knappett & Craig 2020, s. 478–485; RIL 157-2 1990, s. 152–154) käyttävät aktiivipainetta, koska kulmatukimuuri oletetaan siirtyväksi rakenteeksi. Suomalaisen Kaivanto-ohjeen (RIL 263-2014 2014, s. 83) mukaan pysyvät tukimuurit mitoitetaan kuitenkin aina lepopaineelle. Väyläviraston eurokoodi 7:n soveltamisohjeen (NCCI 7 2023, s. 37) sillan rakenteisiin liittyvällä tukimuurilla käytetään lepopainetta.

Lepopaine p₀ lasketaan (RIL 157-2 1990, s. 153-154) kaavalla

$$\mathbf{p}_0 = \sigma'_{\mathbf{v}} K_0, \tag{3.67}$$

jossa σ'_v on maan tehokas pystyjännitys ja K_0 on lepopainekerroin. Jos maanpinta on vaakasuora ja kulmatukimuuri on pystysuora, lepopainekerroin voidaan määrittää kaavalla

$$K_0 = 1 - \sin \varphi'. \tag{3.68}$$

Kuivassa maassa maan tehokas pystyjännitys σ'_{ν} on yhtä kuin maan pystyjännitys σ_{ν} eli

$$\sigma_v = {\sigma'}_v. \tag{3.69}$$

Täysin vedellä kyllästyneessä maassa maan tehokas pystyjännitys σ'_{ν} lasketaan kaavalla

$$\sigma'_{v} = \sigma_{v} - u_{,} \tag{3.70}$$

jossa *u* on huokosveden paine. Maan oman painon aiheuttama pystyjännitys $\sigma_{v,soil}$ lasketaan kaavalla (RIL 157-1 1985, s. 243)

$$\sigma_{\nu,soil} = \gamma z, \tag{3.71}$$

jossa γ on maan tilavuuspaino ja *z* on maan syvyys, jossa pystyjännitystä mitataan. Toisaalta maan oman painon aiheuttama tehokas pystyjännitys $\sigma'_{v,soil}$ voidaan laskea tehokkaan tilavuuspainon γ' avulla kaavalla

$$\sigma'_{v,soil} = \gamma' z. \tag{3.72}$$

4. VERTAILULASKELMAT

Tässä luvussa esitetään tutkimukseen valitut laskentatapaukset, niiden laskentageometriat ja käytetyt parametrit sekä kuormien ja kestävyyden laskenta. Kaikki laskentatapaukset lasketaan sekä nykyisten eurokoodien Suomessa käytettävillä mitoitustavoilla että kaikilla uusien eurokoodien mukaisilla mitoitustavoilla.

4.1 Laskentatapauksissa tehdyt valinnat ja oletukset

Laskennat tehdään eurokoodien mukaisilla analyyttisilla menetelmillä (ks. luvut 2.3.2, 2.4.2, 2.5, ja 3.4–3.6). Laskentatapaukset on valittu siten, että ne edustavat tutkittavia murtorajatiloja monipuolisesti mutta yksinkertaisesti ja tyypillisesti. Laskentatapaukset eivät välttämättä edusta mitään todellisia tilanteita eikä niitä tule käyttää sellaisenaan todellisten tapausten mitoittamiseen. Tässä työssä on valittu, että luotettavuusluokasta riippuva kuormakerroin on aina $K_{Fl} = 1,0$, kuten on myös seuraamusluokasta riippuva seuraamuskerroin $k_F = 1,0$.

Tutkimuksessa mitoitetaan maanvaraiselle neliöanturalle ja jatkuvalle kulmatukimuurille minimileveys *B* kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden murtorajatiloissa (GEO). Tässä työssä kantokestävyyden laskentaan käytetään Prandtlin teoriaan perustuvaa kantokestävyysyhtälöä (ks. luku 3). Lisäksi tarkistetaan eurokoodien epäkeskisyysehdot lukujen 2.3.2 ja 2.4.2 mukaisesti. Maanvaraisella neliöanturalla mitoitus tehdään kolmessa eri pohjaolosuhteessa, joissa jokaisessa kahdella eri vaakakuorman arvolla. Nämä kuusi laskentatapausta esitetään luvussa 4.2. Maanvaraisella kulmatukimuurilla mitoitus tehdään kuudessa eri pohjaolosuhteessa, joissa jokaisessa kahdella eri liikennekuormalla, joka sijaitsee tuettavan maan päällä. Nämä 18 laskentatapausta esitetään luvussa 4.3.

Tutkimuksessa mitoitetaan myös nosturin tukijalan kantokestävyyttä ja lävistysmurtoa (GEO) kerroksellisessa maassa, jossa täyttökerros koostuu karkearakeisesta murskeesta ja pohjamaa pehmeästä savesta. Tukijalan pohja on neliö ja leveydeltään *B*. Mitoitus tehdään laskemalla maksimipystykuorma Q_V kolmella eri täyttökerrospaksuuden D_1 ja tukijalan leveyden *B* yhdistelmällä. Kaikki mitoitukset tehdään kahdella eri saven lujuudella. Nämä kuusi laskentatapausta esitetään luvussa 4.4.

Kallionvaraiselle neliöanturalle ja kulmatukimuurille lasketaan minimileveys *B* staattisen tasapainon (EQU) ja liukumiskestävyyden (GEO) murtorajatiloissa eri kuormilla. Neliö-

antura mitoitetaan yhdellä vaakakuormalla ja kulmatukimuuri kolmella eri liikennekuormalla, joka sijaitsee tuettavan maan päällä. Nämä neljä laskentatapausta esitetään luvuissa 4.5 ja 4.6.

Kaikki laskentatapaukset on esitetty taulukossa 4.1. Laskentatapauksissa ei oteta huomioon murtorajatiloja, jotka koskevat rakenteen tai rakenneosien sisäistä murtumista (STR), kokonaisvakavuutta, nosteen aiheuttamaa murtumista (UPL) tai hydraulista murtumista (HYD). Käyttörajatiloista (SLS) tarkistetaan vain kuormien epäkeskisyys.

Rakenne	Pohjamaa	Täyttö	Kuorma- tai rakennevaihtoehdot				dot
Neliöantura,	Tiivis mo-	Tiivis mo-	Suuri tuulikuorma Pieni tuulikuorm			kuorma	
maanvarainen,	reeni,	reeni, kuiva					
min B	kuiva						
(GEO)	Löyhä	Löyhä					
	hiekka,	hiekka,					
	kuiva	kuiva					
	Siltti, ve-	Murske,					
	dellä kyl-	kuiva					
	lästynyt						
Kulmatukimuuri,	Tiivis mo-	Tiivis mo-	Rautatielii-	Maa	antielii-		Ei liiken-
maanvarainen,	reeni,	reeni, kuiva	kenne-	ken	ne-		nekuor-
ei pohjavettä,	kuiva		kuorma ja	kuo	rma ja		mia
min B	Löyhä	Löyhä	kevyt liikenne	kev	yt liikenr	ne	
(GEO)	hiekka,	hiekka,	-		-		
	kuiva	kuiva					
	Siltti, ve-	Murske,					
	dellä kyl-	kuiva					
	lästynyt						
Kulmatukimuuri,	Tiivis mo-	Tiivis mo-					
maanvarainen,	reeni, ve-	reeni, ve-					
pohjavesi muurin	dellä kyl-	dellä kyl-					
ylätasolla,	lästynyt	lästynyt					
min <i>B</i>	Löyhä	Löyhä					
(GEO)	hiekka, ve-	hiekka, ve-					
	dellä kyl-	dellä kyl-					
	lästynyt	lästynyt					
	Siltti, ve-	Murske,					
	dellä kyl-	vedellä kyl-					
	lästynyt	lästynyt					
Nosturin tukijalka,	Savi, c _u =	Murske,	Pieni tukija-	Suuri	tukija-	Pi	eni tukija-
max Q _V	10 kPa	kuiva	lan pohja ja	lan po	ohja ja	la	n pohja ja
(GEO)	Savi, c _u =		pieni täyttö-	suuri	täyttö-	SL	ıuri täyttö-
	20 kPa		kerros	kerro	S	ke	erros
Neliöantura,	Kallio	Ei täyttöä	Suuri tuulikuorma				
kallionvarainen,							
min <i>B</i>							
(EQU)				1			
Kulmatukimuuri,	Kallio	Murske,	Rautatielii-	Maa	antielii-		Ei liiken-
kallionvarainen,		kuiva	kenne-	ken	ne-		nekuor-
min <i>B</i>			kuorma ja	kuo	rma ja		mia
(EQU)			kevyt liikenne	kev	yt liikenr	ne	

Taulukko 4.1. Tässä tutkimuksessa tarkasteltavat laskentatapaukset.

<u>Kantokestävyys lasketaan</u> avoimessa tilassa maanvaraisen neliöanturan tapauksissa kaavalla (3.39) ja maanvaraisen kulmatukimuurin tapauksissa kaavalla (3.41). Suljetussa tilassa kantokestävyys lasketaan maanvaraisen neliöanturan tapauksissa kaavalla (3.43), maanvaraisen kulmatukimuurin tapauksissa kaavalla (3.44) ja nosturin tukijalan tapauksissa kaavalla (3.65).

Muotokertoimet s_q , s_γ ja s_{cu} lasketaan kaavoilla (3.9), (3.10) ja (3.50) kuormakaltevuuskertoimet i_q , i_γ ja i_{cu} kaavoilla (3.14), (3.15) ja (3.49). Kertoimia s_c ja i_c ei tarvita, koska tehokas koheesio on c' = 0 kaikissa laskentatapauksissa. Syvyyskertoimia d_c , d_q , d_γ ja d_{cu} , maanpinnan kaltevuuskertoimia g_c , g_q , g_γ ja g_{cu} tai pohjakaltevuuskertoimia b_c , b_q , b_γ ja b_{cu} ei käytetä mitoitustapojen vertailun ja laskennan yksinkertaistamiseksi. Nykyisen eurokoodi 7:n kantokestävyyskaavassa (3.42) tai Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeen kantokestävyyskaavassa (NCCI 7 2023, s. 45) ei ole syvyyskertoimia. Maanpinnan kaltevuuskertoimet laskettuna kaavoilla (3.34), (3.36) tai (3.48) eivät vaikuta mitoitustapojen vertailuun ilman tehokasta koheesiota c', jolloin vaikutus on jokaisella mitoitustavalla suhteellisen sama, kun maanpinta on kaikissa tapauksissa vaakasuora. Perustuksen, tukimuurin ja nosturin tukijalan pohja on kaikissa tapauksissa vaakasuora, mikä on tyypillistä todellisissa tapauksissa.

Liukumiskestävyys lasketaan maanvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin tapauksissa

- mitoitustavoilla DA2 ja DA2* kaavalla (2.14),
- mitoitustavoilla (a), (b) ja (c) kaavalla (2.33),
- mitoitustavalla (d) kaavalla (2.34) ja
- mitoitustavalla (e) kaavalla (2.35).

Myös siltin laskentatapauksissa oletetaan liukumiskestävyydelle avoin tila, koska neliöantura ja kulmatukimuuri ovat murskepatjan päällä. Kallionvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin tapauksissa liukumiskestävyys lasketaan

- mitoitustavalla DA2* kaavalla (2.14) ja
- mitoitustavalla (e) kaavalla (2.35).

Staattinen tasapaino kallionvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin laskentatapauksissa osoitetaan kaavalla (2.41). Kuormat lasketaan luvun 2.5 mukaisesti.

4.2 Neliöantura maanvaraisesti (GEO)

Maanvaraiselle neliöanturalle mitoitetaan minimileveys *B* kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden murtorajatiloissa (GEO). Mitoitus tehdään kolmessa eri pohjaolosuhteessa, kuivassa tiiviissä moreenissa, kuivassa löyhässä hiekassa ja kuivassa mursketäytössä siltin päällä. Jokaisessa pohjaolosuhteessa mitoitus tehdään kahdella eri vaakakuorman arvolla. Laskentatapauksia on siis kuusi.

Alaluvussa 4.2.1 esitetään maanvaraisen neliöanturan laskentatapauksien mitoitustavat, ja mitoitusehdot. Alaluvussa 4.2.2 esitetään laskentatapauksien laskentageometria ja kuormien laskenta. Alaluvuissa 4.2.3 ja 4.2.4 esitetään laskentatapauksien epäkeskisyyden ja kestävyyksien laskenta. Alaluvussa 4.2.5 esitetään kolmen pohjaolosuhteen tarkempi laskentageometria ja maaparametrit.

4.2.1 Mitoitustavat ja mitoitusehdot

Maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukset mitoitetaan Suomessa nykyisin käytettävillä mitoitustavoilla DA2 ja DA2* (ks. luku 2.3) sekä uusilla mitoitustavoilla eli taulukon 2.3 yhdistelmillä (*a*), (*b*), (*c*), (*d*) ja (*e*). Lisäksi mitoitetaan yhdistelmällä VC4+RFA*, joka on taulukon 2.3 yhdistelmä (*e*) ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40). Maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukset mitoitetaan siis kahdeksalla mitoitustavalla.

Nykyisille mitoitustavoille on tässä työssä valittu käytettävän Ympäristöministeriön kuormitusyhtälöparia 6.10a (2.19) ja 6.10b (2.20) ja uusille mitoitustavoille kuormitusyhtälöparia 8.14a (2.29) ja 8.14b (2.30). Lisäksi jokaisessa tapauksessa tarkastellaan pystykuormat erikseen tapauksina (V_{min}) ja tapauksina (V_{max}). Mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3 osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin, ja V_{min} tarkoittaa pystykuormien tarkastelua edullisina ja V_{max} pystykuormien tarkastelua epäedullisina.

Mitoitustavoilla DA2* ja VC4 osavarmuusluvut kohdistetaan pystykuormien vaikutukseen N_d , joka on aina epäedullinen kantokestävyyden kannalta. Niillä V_{min} tarkoittaa epäkeskisyyden e ja pystykuorman vaikutuksen N_d laskemista ilman muuttuvia pystykuormia. V_{max} tarkoittaa epäkeskisyyden e ja pystykuorman vaikutuksen N_d laskemista muuttuvien pystykuormien kanssa. Koska kuormitusyhtälöt 6.10a (2.19) ja 8.14a (2.29) eivät sisällä muuttuvia kuormia, mitoitustavoilla DA2* ja VC4 näillä kuormitusyhtälöillä ei tarvitse laskea V_{min} -tapauksia.

Vaakakuormat ovat aina epäedullisia. Maanvaraisen neliöanturan mitoitustapamatriisi on esitetty taulukossa 4.2. Liukumiskestävyyden ja epäkeskisyyden kannalta pystykuormat ovat aina edullisia, joten niistä tarkistetaan vain *Vmin*-tapaukset taulukosta 4.2.

Mitoitustapa	V _{max}	V _{max}	V _{min}	V _{min}		
DA2	6.10a	6.10b	6.10a	6.10b		
DA2*	6.10a	6.10b	-	6.10b		
(a) VC1+M1	8.14a	8.14b	8.14a	8.14b		
(b) VC3+M2	8.14a	8.14b	8.14a	8.14b		
(c) VC1+M2	8.14a	8.14b	8.14a	8.14b		
(d) VC1+RFA	8.14a	8.14b	8.14a	8.14b		
(e) VC4+RFA	8.14a	8.14b	-	8.14b		
VC4+RFA*	8.14a	8.14b	-	8.14b		

Taulukko 4.2. *Mitoitustapamatriisi maanvaraiselle neliöanturalle.* VC4+RFA* viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40).

Laskentatapauksissa leveys B minimoidaan iterointitarkkuudella 0,1 m niin, että toteutuu

- kantokestävyysehto (2.31) " $N_d \leq R_{Nd}$ ",
- liukumiskestävyysehto (2.32) " $T_d \leq R_{Td}$ ",
- mitoitustavoilla DA2* ja VC4 epäkeskisyysehto (2.22) " $e_{B,k}/B \le 1/3$ ",
- mitoitustavoilla VC1 ja VC3 " $e_{B,d}/B \le 1/3$ "- ehto eli epäkeskisyysehto (2.21) kuormien mitoitusarvoilla laskettuna, ja
- mitoitustavalla VC4+RFA lisäksi " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehto (2.40).

Epäkeskisyysehtoa (2.23) " $e_{B,G,k}/B \le 1/6$ " ei tarvitse tarkistaa, koska laskentatapauksissa ei ole pysyviä vaakakuormia. Mitoitustavoilla VC1 ja VC3 epäkeskisyydelle sovelletaan epäkeskisyysehtoa (2.21) " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " kuormien mitoitusarvoilla laskettuna, koska uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 72) kohdat 5.6.2.2(5) ja 5.6.2.2(6) on tulkittu siten, että epäkeskisyys murtorajatilassa lasketaan käyttäen kuormien mitoitusarvoja (ks. luku 2.4.2). Mitoitustavoilla VC1 ja VC3 on turha käyttää mitoitusehtoa (2.22) ehdon " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " lisäksi, koska epäkeskisyys mitoitusarvoilla laskettuna on aina suurempi kuin ominaisarvoilla laskettuna. Mitoitustavalla VC4 päätettiin käyttää epäkeskisyysehtoa (2.22) " $e_{B,k}/B \le 1/3$ " eikä " $e_{B,d}/B \le 1/3$ "- ehtoa, vaikka muuttuvaan kuormaan kohdistetaan osavarmuusluku $\gamma_{Q,red}$, koska ehto " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " on uudessa eurokoodi 7:n luonnoksessa niin tulkinnanvarainen (ks. luku 2.4.2).

Laskemisen yksinkertaistamiseksi liukumiskestävyyden mitoituksessa ei käytetä liukumiskestävyysehdon (2.32) liukumista vastustava maanpaineen resultantin termiä $R_{Td,face}$, koska perustuksen molempiin reunoihin kohdistuvan maanpaineen oletetaan kumoavan toisensa.

4.2.2 Laskentageometria ja kuormat

Maanvaraisen neliöanturan laskentatapauksissa neliöantura on perustettu syvyyteen D = 1,5 m ja sen pilarin paksuus on b = 0,5 m ja anturan paksuus on d = 0,5 m. Maanpinta

ja perustuksen pohjat ovat vaakasuoria. Perustukseen kohdistuu keskeisesti pysyvä ominaispystykuorma $G_{V,k}$ = 1000 kN ja muuttuva ominaispystykuorma $Q_{V,k}$ = 250 kN. Pilariin leveyden *B* suuntaisesti kohdistuva muuttuva ominaisvaakakuorma on joko $Q_{H,k}$ = 150 kN etäisyydellä *h* = 4,0 m maanpinnasta tai $Q_{H,k}$ = 50 kN etäisyydellä *h* = 2,0 m maanpinnasta. Laskennassa otetaan huomioon myös neliöanturan painon ominaisarvo $W_{antura,k}$, pilarin painon ominaisarvo $W_{pilari,k}$ (maanpintaan asti) ja anturan yläpuolisen maan painon ominaisarvo $W_{täyttö,k}$, joiden summa W_k lasketaan kaavalla

$$W_k = W_{antura,k} + W_{pilari,k} + W_{täyttö,k}.$$
(4.1)

Ominaisarvot W_{antura,k}, W_{pilari,k} ja W_{täyttö,k} lasketaan kaavoilla

$$W_{antura,k} = \gamma_b dB^2, \tag{4.2}$$

$$W_{pilari,k} = \gamma_b (D-d) b^2 \text{ ja}$$
(4.3)

$$W_{t \ddot{a} y t t \ddot{o}, k} = \gamma (B^2 - b^2) (D - d),$$
 (4.4)

joissa betonin tilavuuspaino on γ_b = 25 kN/m³ ja γ on anturan yläpuolisen maan tilavuuspaino.

Kuvassa 4.1 on esitetty maanvaraisen neliöanturan laskentageometria ja kuormat ilman pohjaolosuhteita. Maanvaraisen neliöanturan kolme eri pohjaolosuhdetta, tiivis moreeni, löyhä hiekka ja mursketäyttö siltillä, esitetään luvussa 4.2.5 maaparametreineen. Tiiviin moreenin, löyhä hiekan ja mursketäytön tehokas koheesio on c' = 0 laskemisen yksinkertaistamiseksi.



Kuva 4.1. Maanvaraisen neliöanturan laskentageometria ja kuormat.

<u>*V_{max}*-tapauksissa</u> perustuksen pohjaan pystysuorasti kohdistuvan kuormien vaikutuksen mitoitusarvo N_d ja sen aiheuttaneet pystykuormat tarkastellaan epäedullisina. Mitoitustavoilla DA2 ja DA2* N_d lasketaan kuormitusyhtälöparilla

$$6.10a: N_d = 1,35 \cdot (G_{V,k} + W_k) \text{ ja}$$
(4.5)

$$6.10b: N_d = 1,15 \cdot (G_{V,k} + W_k) + 1,5 \cdot Q_{V,k}.$$

$$(4.6)$$

Uusilla mitoitustavoilla VC1, VC3 ja VC4 N_d lasketaan kuormitusyhtälöparilla

8.14*a*:
$$N_d = \gamma_G(G_{V,k} + W_k)$$
 ja (4.7)

8.14b:
$$N_d = \gamma_E[\xi \gamma_G \cdot (G_{V,k} + W_k) + \gamma_Q \cdot Q_{V,k}],$$
 (4.8)

joissa osavarmuusluvut γ_G , γ_Q ja γ_E saadaan taulukosta 2.5. Pienennyskerroin on ξ = 0,85. Kuitenkin tulo $\xi\gamma_G$ ei ole alle 1,0. Mitoitustavalla VC4 ei käytetä pienennyskerrointa ξ (ks. luku 2.4.2).

<u> V_{min} -tapauksissa</u> mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3 N_d :n aiheuttaneet pystykuormat tarkastellaan edullisina, joten N_d lasketaan kuormitusyhtälöpareilla

6.10*a*:
$$N_d = 0.9 \cdot (G_{V,k} + W_k)$$
 ja 6.10*b*: $N_d = 0.9 \cdot (G_{V,k} + W_k)$ ja (4.9)

$$8.14a: N_d = 1,0 \cdot (G_{V,k} + W_k) \text{ ja } 8.14b: N_d = 1,0 \cdot (G_{V,k} + W_k). \tag{4.10}$$

Mitoitustavoilla DA2* ja VC4 N_d tarkastellaan epäedullisena ilman muuttuvia pystykuormia, joten N_d lasketaan kuormitusyhtälöpareilla

$$6.10a: N_d = 1,35 \cdot (G_{V,k} + W_k) \text{ ja } 6.10b: N_d = 1,15 \cdot (G_{V,k} + W_k) \text{ ja}$$
(4.11)

8.14*a*:
$$N_d = 1,35 \cdot (G_{V,k} + W_k)$$
 ja 8.14*b*: $N_d = 1,35 \cdot (G_{V,k} + W_k)$. (4.12)

Vaakasuoraan perustuksen pohjaan kohdistuvan kuorman T_d tarkastellaan epäedullisena aina. Mitoitustavoilla DA2 ja DA2* T_d lasketaan kuormitusyhtälöparilla

$$6.10a: T_d = 0, (4.13)$$

$$6.10b: T_d = 1,5 \cdot Q_{H,k}. \tag{4.14}$$

Uusilla mitoitustavoilla VC1, VC3 ja VC4 T_d lasketaan kuormitusyhtälöparilla

$$8.14a: T_d = 0 \text{ ja} \tag{4.15}$$

$$8.14b: T_d = \gamma_E \cdot \gamma_Q \cdot Q_{H,k}, \tag{4.16}$$

joissa osavarmuusluvut γ_Q ja γ_E saadaan taulukosta 2.5.

4.2.3 Epäkeskisyyden laskenta

Laskentatapauksissa epäkeskisyyttä on vain perustuksen leveyden *B* suunnassa. Epäkeskisyyttä aiheuttaa vain muuttuva vaakakuorma Q_H , koska pystykuormat ovat keskeisiä, joten epäkeskisyys kuormitusyhtälöillä 6.10a ja 8.14a on e_B = 0. Epäkeskisyyden e_B on toteutettava momenttitasapainoyhtälö

$$T \cdot y = N \cdot e_B, \tag{4.17}$$

jossa *y* on vaakaresultantin *T* pystyetäisyys perustuksen pohjan keskipisteestä. Tarkistettaessa epäkeskisyysehtoja " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " ja (2.22) pystyresultantti *N* tarkastellaan edullisena. Laskettaessa tehokasta leveyttä *B*' kaavalla (3.12) pystyresultantti *N* tarkastellaan *Vmin*-tapauksissa edullisena, mutta *Vmax*-tapauksissa epäedullisena. Mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3 pystyresultantin *N* edullisena tarkastelu tarkoittaa edullisen kuorman osavarmuuslukujen kohdentamista pystykuormiin ja epäedullisena tarkastelu epäedullisen kuorman osavarmuuslukujen kohdentamista pystykuormiin. Mitoitustavoilla DA2* ja VC4 pystyresultantin *N* edullisena tarkastelu tarkoittaa laskemista ilman muuttuvia kuormia ja epäedullisena tarkastelu laskemista muuttuvien kuormien kanssa.

<u>Mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3</u> epäkeskisyys e_B lasketaan kaavalla

$$e_{B,d} = \frac{T_d \cdot (h+D)}{N_d}.$$
 (4.18)

Laskettaessa tehokasta leveyttä *B*' kaavan (4.18) T_d lasketaan kaavoilla (4.13) – (4.16), N_d Vmin-tapauksissa kaavapareilla (4.9) ja (4.10) ja N_d Vmax-tapauksissa kaavoilla (4.5) - (4.8). Mitoitustapojen VC1 ja VC3 epäkeskisyysehtoa " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " varten kaavan (4.18) T_d lasketaan kaavalla (4.16) ja N_d kaavaparilla (4.10).

<u>Mitoitustavoilla DA2* ja VC4</u> epäkeskisyysehtoa (2.22) varten epäkeskisyys e_B lasketaan kaavalla

$$e_{B,k} = \frac{T_k \cdot y}{N_k} = \frac{Q_{H,k} \cdot (h+D)}{G_{V,k} + W_k}.$$
(4.19a)

<u>Mitoitustavalla DA2*</u> epäkeskisyys e_B tehokasta leveyttä *B*' varten *Vmin*-tapauksissa lasketaan kaavalla (4.19a) ja *Vmax*-tapauksissa varten kaavalla

$$e_{B,k} = \frac{T_k \cdot y}{N_k} = \frac{Q_{H,k} \cdot (h+D)}{G_{V,k} + Q_{V,k} + W_k}.$$
 (4.19b)

<u>Mitoitustavalla VC4</u> muuttuvaan kuormaan kohdistetaan osavarmuusluku $\gamma_{Q,red}$, joten epäkeskisyys e_B tehokasta leveyttä *B*' varten *Vmin*-tapauksissa lasketaan kaavalla

$$e_{B,d} = \frac{T_k \cdot y}{N_k} = \frac{\gamma_{Q,red} \cdot Q_{H,k} \cdot (h+D)}{G_{V,k} + W_k}.$$
 (4.20a)

ja Vmax-tapauksissa kaavalla

$$e_{B,d} = \frac{T_k \cdot y}{N_k} = \frac{\gamma_{Q,red} \cdot Q_{H,k} \cdot (h+D)}{G_{V,k} + \gamma_{Q,red} \cdot Q_{V,k} + W_k}.$$
(4.20b)

<u>Mitoitustavan VC4+RFA lisäehdon (2.40)</u> *T*:n ja *N*:n (edullinen, *Vmin*) edustavat arvot ovat $T_{rep} = Q_{H,k}$ ja $N_{rep} = G_{V,k} + W_k$ kaavan (2.4) mukaisesti ($\psi = 1,0$).

4.2.4 Kestävyyden laskenta

<u>Kantokestävyyden ominaisarvo $R_{N,k} = R_N$ lasketaan</u> tiiviin moreenin ja löyhän hiekan laskentatapauksissa avoimen tilan kaavalla (3.39), ilman syvyyskertoimia d_c , d_q ja d_γ . Kantokestävyyden ominaisarvo $R_{Nu,k} = R_{Nu}$ lasketaan siltin laskentatapauksissa suljetun tilan kaavalla (3.43), ilman syvyyskerrointa d_{cu} .

Mitoitustavoilla DA2 ja DA2* kantokestävyyden avoimen ja suljetun tilan mitoitusarvot ovat $R_{N,d} = R_{N,k}/1,55$ ja $R_{Nu,d} = R_{Nu,k}/1,55$. Mitoitustavoilla VC1+RFA ja VC4+RFA kantokestävyyden avoimen ja suljetun tilan mitoitusarvot ovat $R_{N,d} = R_{N,k}/1,4$ ja $R_{Nu,d} = R_{Nu,k}/1,4$. Mitoitustavoilla VC1+M1, VC3+M2 ja VC1+M2 kantokestävyyden avoimen ja suljetun tilan mitoitusarvot ovat $R_{N,d} = R_{N,k}/1,4$.

Mitoitustavoilla DA2, DA2*, VC1+M1, VC1+RFA ja VC4+RFA käytetään tehokkaasta kitkakulmasta φ' ja suljetusta leikkauslujuudesta c_u ominaisarvoja φ'_k ja $c_{u,k}$. Mitoitustavoilla VC3+M2 ja VC1+M2 käytetään tehokkaasta kitkakulmasta φ' ja suljetusta leikkauslujuudesta c_u mitoitusarvoja φ'_d ja $c_{u,d}$, jotka lasketaan kaavoilla

$$\varphi'_d = \tan^{-1} \frac{\tan \varphi'_k}{\gamma_{\varphi'}} \,\text{ja} \tag{4.21}$$

$$c_{u,d} = \frac{c_{u,k}}{\gamma_{cu}},\tag{4.22}$$

joissa osavarmuusluvut $\gamma_{\varphi'}$ =1,25 ja γ_{cu} = 1,40 ovat taulukon 2.7 mukaiset.

<u>Mitoitustavalla DA2*</u> tehokkaan leveyden *B*' kaavan (3.12) epäkeskisyys e_B lasketaan *Vmin*-tapauksissa kaavalla (4.19a) ja *Vmax*-tapauksissa kaavalla (4.19b). Kuormakaltevuuskertoimien i_q , i_γ , ja i_{cu} kaavojen (3.14), (3.15) ja (3.49) parametrit *T* ja *N* ovat ominaisarvoja T_k ja N_k , jotka ovat kuormitusyhtälöillä 6.10a ja 6.10b

$$6.10a: T_k = 0, (4.23a)$$

$$6.10b: T_k = Q_{H,k}, (4.23b)$$

$$6.10a: N_k = G_{V,k} + W_k \text{ ja} \tag{4.24a}$$

6.10b: Vmax:
$$N_k = G_{V,k} + Q_{V,k} + W_k$$
, Vmin: $N_k = G_{V,k} + W_k$. (4.24b)

<u>Mitoitustavalla VC4+RFA</u> tehokkaan leveyden *B*' kaavan (3.12) epäkeskisyys e_B lasketaan *Vmin*-tapauksissa kaavalla (4.20a) ja *Vmax*-tapauksissa kaavalla (4.20b). Kuormakaltevuuskertoimien i_q , i_y , ja i_{cu} kaavojen (3.14), (3.15) ja (3.49) parametrit *T* ja *N* ovat ominaisarvoja T_k ja N_k , jotka ovat kuormitusyhtälöillä 8.14a ja 8.14b

$$8.14a: T_k = 0, (4.25a)$$

8.14b:
$$T_k = \gamma_{Q,red} \cdot Q_{H,k}$$
, (4.25b)

$$8.14a: N_k = G_{V,k} + W_k \text{ ja} \tag{4.26a}$$

8.14b: Vmax:
$$N_k = G_{V,k} + \gamma_{O,red} \cdot Q_{V,k} + W_k$$
, Vmin: $N_k = G_{V,k} + W_k$. (4.26b)

<u>Mitoitustavoilla DA2, VC1+M1, VC3+M2, VC1+M2, VC1+RFA</u> tehokkaan leveyden *B'* kaavan (3.12) epäkeskisyys e_B lasketaan kaavan (4.18) mukaisesti. Kuormakaltevuuskertoimien i_q , i_γ , ja i_{cu} kaavojen (3.14), (3.15) ja (3.49) parametrit *T* ja *N* ovat mitoitusarvoja T_d ja N_d , jotka lasketaan luvun 4.2.2 mukaisesti.

Perustuksen pohjan tehokas pinta-ala on $A' = B' \times B$ kaavan (3.40) mukaisesti, koska epäkeskisyyttä on vain leveyden B suuntaisesti ja koska neliöanturalla on B = L.

<u>Liukumiskestävyyden mitoitusarvo *R_{Td}* lasketaan</u> avoimen tilan mitoitustavoilla DA2 ja DA2* kaavalla (2.14), mitoitustavoilla VC1+M1, VC3+M2 ja VC1+M2 kaavalla (2.33), mitoitustavalla VC1+RFA kaavalla (2.34) ja mitoitustavalla VC4+RFA kaavalla (2.35). Myös siltin laskentatapauksissa oletetaan liukumiskestävyydelle avoin tila, koska neliöantura

on murskepatjan päällä. Rakenteen ja maan välinen kitkakulma δ oletetaan yhtä suureksi kuin maan kitkakulma φ' , joten pätee $\delta_k = \delta_{rep} = \varphi'_k$ ja $\delta_d = \varphi'_d$.

Tehokkaan pystykuorman mitoitusarvo V'_{a} on aina edullinen. Mitoitustavalla DA2 se on kaavojen (4.9) ja (4.10) mukaisesti

$$V'_d = N_d = 0.9 \cdot (G_{V,k} + W_k). \tag{4.27}$$

Mitoitustavalla DA2* V'd lasketaan ominaisarvoilla kaavalla

$$V'_d = V'_k = N_k = G_{V,k} + W_k. ag{4.28}$$

Pysyvien edullisten pystykuormien mitoitusarvo $N_{G,d,fav}$ on kaavojen (4.11) ja (4.12) mukaisesti

$$N_{G,d,fav} = N_d = 1,0 \cdot (G_{V,k} + W_k). \tag{4.29}$$

Pysyvien edullisten pystykuormien edustava arvo $N_{G,rep,fav}$ lasketaan ominaisarvoilla kaavalla

$$N_{G,rep,fav} = N_k = G_{V,k} + W_k. (4.30)$$

Nostetta *U* ei ole ja nosteen mitoitusarvo ja edustava arvot ovat $U_d = 0$ ja $U_{rep} = 0$.
4.2.5 Pohjaolosuhteet

Maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukset kuivassa tiiviissä moreenissa suurella ja pienellä vaakakuormalla Q_H ja vaakakuorman etäisyydellä *h* on esitetty kuvassa 4.2. Moreenin tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on $\varphi'_k = 38^\circ$, tehokas koheesio on c' = 0 ja tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = 19$ kN/m³. Moreeni on kuivaa. Maanpinta ja perustuksen pohja ovat vaakasuoria.



Kuva 4.2. Maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukset kuivassa tiiviissä moreenissa suurella ja pienellä vaakakuormalla.

Maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukset kuivassa löyhässä hiekassa suurella ja pienellä vaakakuormalla Q_H ja vaakakuorman etäisyydellä *h* on esitetty kuvassa 4.3. Hiekan tehokas kitkakulma on $\varphi' = 32^\circ$, tehokas koheesio on c' = 0 ja tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = 16$ kN/m³. Hiekka on kuivaa. Maanpinta ja perustuksen pohja ovat vaakasuoria.



Kuva 4.3. Maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukset kuivassa löyhässä hiekassa suurella ja pienellä vaakakuormalla.

Maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukset kuivassa mursketäytössä siltin päällä suurella ja pienellä vaakakuormalla Q_H ja vaakakuorman etäisyydellä *h* on esitetty kuvassa 4.4. Neliöantura on perustettu murskepatjalle, jonka on paksuus 0,5 m. Mursketäytön tehokas kitkakulma on $\varphi' = 38^\circ$, tehokas koheesio on c' = 0 ja tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = 19$ kN/m³. Siltin suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo on $c_{u,k} = 35$ kPa. Pohjavedenpinta on siltin yläpinnassa ja mursketäyttö on kuiva. Maanpinta ja perustuksen pohja ovat vaakasuoria. Kantokestävyys R_{Nu} lasketaan suljetun tilan kaavalla (3.43) ilman syvyyskerrointa d_{cu} , joten perustamistason yläpuolisen murskeen lujuutta ei oteta huomioon. Vain perustamistason yläpuolisen murskeen paino otetaan huomioon kaavan (3.43) perustamistason yläpuolisessa kuormassa q. Murskepatjan lujuutta tai painoa ei oteta huomioon kantokestävyyden laskennassa. Tästä johtuva virhe oletetaan merkityksettömän pieneksi eurokoodien nykyisten ja uusien mitoitustapojen vertailussa.





4.3 Kulmatukimuuri maanvaraisesti (GEO)

Maanvaraiselle kulmatukimuurille mitoitetaan minimileveys *B* kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden murtorajatiloissa (GEO). Mitoitus tehdään kuudessa eri pohjaolosuhteessa, kuivassa ja vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa, kuivassa ja vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa ja kuivassa ja vedellä kyllästyneessä mursketaustatäytössä siltin päällä. Jokaisessa pohjaolosuhteessa mitoitus tehdään kolmella eri liikennekuorman arvolla. Laskentatapauksia on siis 18.

Alaluvussa 4.3.1 esitetään maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien mitoitustavat ja mitoitusehdot. Alaluvuissa 4.3.2 ja 4.3.3 esitetään laskentatapauksien laskentageometria ja kuormien laskenta. Alaluvuissa 4.3.4 ja 4.3.5 esitetään laskentatapauksien epäkeskisyyden ja kestävyyden laskenta. Alaluvussa 4.3.6 esitetään kuuden pohjaolosuhteen tarkempi laskentageometria ja maaparametrit.

4.3.1 Mitoitustavat ja mitoitusehdot

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset mitoitetaan Suomessa nykyisin käytettävillä mitoitustavoilla DA2 ja DA2* (ks. luku 2.3) sekä uusilla mitoitustavoilla eli taulukon 2.4 yhdistelmillä (*a*), (*b*), (*c*), (*d*) ja (*e*). Lisäksi mitoitetaan yhdistelmällä VC4+RFA*, joka on taulukon 2.4 yhdistelmä (*e*) ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40). Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset mitoitetaan siis kahdeksalla mitoitustavalla.

Nykyisille mitoitustavoille on tässä työssä valittu käytettävän LVM:n kuormitusyhtälöparia 6.10a (2.17) ja 6.10b (2.18) ja uusille mitoitustavoille kuormitusyhtälöparia 8.14a (2.29) ja 8.14b (2.30). Lisäksi jokaisessa tapauksessa tarkastellaan pystykuormat erikseen tapauksina (V_{min}) ja tapauksina (V_{max}). Mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3 osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin, ja V_{min} tarkoittaa pystykuormien tarkastelua edullisina ja V_{max} pystykuormien tarkastelua epäedullisina.

Mitoitustavoilla DA2* ja VC4 osavarmuusluvut kohdistetaan pystykuormien vaikutukseen N_d , joka on aina epäedullinen kantokestävyyden kannalta. Niillä V_{min} tarkoittaa epäkeskisyyden *e* ja pystykuorman vaikutuksen N_d laskemista ilman muuttuvia pystykuormia. V_{max} tarkoittaa epäkeskisyyden *e* ja pystykuorman vaikutuksen N_d laskemista muuttuvien pystykuormien kanssa. Koska kuormitusyhtälöt 6.10a (2.19) ja 8.14a (2.29) eivät sisällä muuttuvia kuormia, mitoitustavoilla DA2* ja VC4 näillä kuormitusyhtälöillä ei tarvitse laskea V_{min} -tapauksia.

Vaakakuormat ovat aina epäedullisia. Maanvaraisen kulmatukimuurin mitoitustapamatriisi on esitetty taulukossa 4.3. Liukumiskestävyyden ja epäkeskisyyden kannalta pystykuormat ovat aina edullisia, joten niistä tarkistetaan vain *Vmin*-tapaukset taulukosta 4.3.

Mitoitustapa	V _{max}	V _{max}	V _{min}	V _{min}			
DA2	6.10a	6.10b	6.10a	6.10b			
DA2*	6.10a	6.10b	-	6.10b			
(a) VC4+M1	8.14a	8.14b	-	8.14b			
(b) VC3+M2	8.14a	8.14b	8.14a	8.14b			
(c) VC1+M2	8.14a	8.14b	8.14a	8.14b			
(d) VC1+RFA	8.14a	8.14b	8.14a	8.14b			
(e) VC4+RFA	8.14a	8.14b	-	8.14b			
VC4+RFA*	8.14a	8.14b	-	8.14b			

Taulukko 4.3. *Mitoitustapamatriisi maanvaraiselle kulmatukimuurille.* VC4+RFA* viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40).

Laskentatapauksissa leveys B minimoidaan iterointitarkkuudella 0,1 m niin, että toteutuu

- kantokestävyysehto (2.31) " $N_d \leq R_{Nd}$ ",
- liukumiskestävyysehto (2.32) " $T_d \leq R_{Td}$ ",
- mitoitustavoilla DA2* ja VC4 epäkeskisyysehdot (2.22) "e_{B,k}/B ≤ 1/3" ja (2.23)
 "e_{B,G,k}/B ≤ 1/6",
- mitoitustavoilla VC1 ja VC3 "e_{B,d}/B ≤ 1/3"- ehto eli epäkeskisyysehto (2.21) kuormien mitoitusarvoilla laskettuna ja epäkeskisyysehto (2.23) "e_{B,G,k}/B ≤ 1/6",
- mitoitustavalla VC4+RFA lisäksi "*T_{rep}/N_{rep}* ≤ 0,2"-ehto (2.40).

Mitoitustavoilla VC1 ja VC3 epäkeskisyydelle sovelletaan epäkeskisyysehtoa (2.21) kuormien mitoitusarvoilla laskettuna, koska uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 72) kohdat 5.6.2.2(5) ja 5.6.2.2(6) on tulkittu siten, että epäkeskisyys murtorajatilassa lasketaan käyttäen kuormien mitoitusarvoja (ks. luku 2.4.2). Mitoitustavoilla VC1 ja VC3 on turha käyttää mitoitusehtoa (2.22) ehdon " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " lisäksi, koska epäkeskisyys mitoitusarvoilla laskettuna on suurempi kuin ominaisarvoilla laskettuna. Mitoitustavalla VC4 päätettiin käyttää epäkeskisyysehtoa (2.22) " $e_{B,k}/B \le 1/3$ " eikä " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " eikä " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " on uudessa eurokoodi 7:n luonnoksessa niin tulkinnanvarainen (ks. luku 2.4.2).

Liukumiskestävyysehdon (2.32) liukumista vastustava maanpaineen resultantin termiä $R_{Td,face}$ ei tarvita, koska tukimuurin edessä ei ole maata.

4.3.2 Laskentageometria ja ominaiskuormat

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien laskentageometria ja kuormat on esitetty kuvassa 4.5 ilman pohjaolosuhteita. Perustamissyvyys on D = 0 m, koska täyttöä tukimuurin edessä ei ole ja Prandtlin teorian mukainen murtopinta on kulmatukimuurin

alta sen etupuolelle. Kulmatukimuurin seinän ja pohjan paksuus on s = 0,30 m. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on $H_{muuri} = 3,0$ m tiiviin moreenin ja löyhän hiekan laskentatapauksissa ja $H_{muuri} = 2,0$ m siltin laskentatapauksissa. Kulmatukimuurin ja sen taustatäytön muodostamaan kappaleeseen, joka rajautuu kuvassa 4.5 katkoviivaan ja joka oletetaan jäykäksi kappaleeksi, kohdistuu vaakakuorma *T*, joka on lepopaineen resultantin P_0 ja mahdollisen huokosvedenpaineen resultantin P_u summa $T = P_0 + P_u$. Mahdollisesta vedenpaineesta kohdistuu kulmatukimuurin pohjaan noste *U*, mutta sitä ei oteta huomioon kantokestävyyden laskemisessa. Liukumiskestävyyden laskemisessa noste otetaan huomioon. Huokosvesi ei virtaa.

Kulmatukimuurin pystymuurin painon ominaisarvo on $W_{muuri,k}$, pohjalaatan painon ominaisarvo on $W_{pohja,k}$ ja kulmatukimuurin taustatäytön (kuvassa 4.5 katkoviivaan asti) ominaisarvo on $W_{taustatäyttö,k}$. Näiden summa W_k lasketaan kaavalla

$$W_k = W_{muuri,k} + W_{pohja,k} + W_{taustatäyttö,k}.$$
(4.31)

Ominaisarvot $W_{muuri,k}$, $W_{pohja,k}$ ja $W_{taustatäyttö,k}$ lasketaan kaavoilla

$$W_{muuri,k} = \gamma_b H_{muuri} s, \tag{4.32}$$

$$W_{pohja,k} = \gamma_b Bs \text{ ja} \tag{4.33}$$

$$W_{taustatäyttö,k} = \gamma(B-s)H_{muuri}, \tag{4.34}$$

joissa betonin tilavuuspaino on γ_b = 25 kN/m³ ja γ on taustatäytön tilavuuspaino.

.



Kuva 4.5. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentageometria ja kuormat. Liikennekuormien q₁, q₂ ja q₃ ominaisarvot eri kuormatapauksissa on esitetty taulukossa 4.4.

<u>Rautatieliikennekuorman tapauksissa</u> oletetaan, että suoraan kulmatukimuurin yläpuolella maanpinnalla on huoltoliikennekuorma $q_{1,k} = 8$ kPa leveydellä $B_{q1} = B - s$. Kulmatukimuurin takana, virtuaalipinnan kohdalta taakse päin on rautatieliikenteen ominaiskuorma $q_{3,k} = 76$ kPa. Tämä perustuu Liikenneviraston (nykyisen Väyläviraston) ohjeen Ratateknisen ohjeet osa 3 (RATO3 2018, s. 25) kuormakaavioon LM71-30, jota käytetään Väyläviraston eurokoodi 7:n soveltamisohjeen (NCCI 7 2023, s. 36) mukaan pysyville tukiseinille, jos hankkeen suunnitteluperusteet eivät esitä toisin. Koska radan tasaus oletetaan 0,80 m maanpintaa korkeammalle LM71-30 mallinnetaan nauhakuormien q_{vk} = 106 kN/m ja Δq_{vk} = 102 kN/m summana, joka kerrotaan uusien ratojen dynaamisella sysäyskertoimella 1,25 (RATO3 2018, s. 30) ja jaetaan leveydelle B_{q3} = 3,4 m eli

$$q_{3,k} = 1,25 \cdot \frac{q_{\nu k} + \Delta q_{\nu k}}{B_{q3}} = 76 \text{ kPa.}$$
 (4.35)

Leveys B_{q3} = 3,4 m perustuu ratapölkkyjen pituuteen 2,6 m (RATO3 2018, s. 24), kun ratapölkyt oletetaan 0,80 m korkeuteen ratapenkereen päälle ja kuorman oletetaan jakautuvan Brinch Hansenin 2:1-menetelmän mukaisesti. Ratapölkkyjen ja penkereen kuormaa ei oteta huomioon. <u>Maantieliikennekuorman tapauksissa</u> oletetaan, että suoraan kulmatukimuurin yläpuolella maanpinnalla on Väyläviraston eurokoodi 7:n soveltamisohjeen (NCCI 7 2023, s. 36) kevyenliikenteenväylän huoltoliikennekuorma $q_{1,k} = 0,40 \cdot 20$ kPa = 8 kPa leveydellä $B_{q1} = B - s$. Kulmatukimuurin takana on Väyläviraston eurokoodi 7:n soveltamisohjeen (NCCI 7 2023, s. 36) mukaisesti tieliikennekuorma 3,0 m leveällä alueella 20 kPa ja muualla vähintään 9 kPa. Tämä mallinnetaan superpositioperiaatteen mukaisesti niin, että kulmatukimuurin takana, virtuaalipinnan kohdalta taakse päin on leveydelle $B_{q3} =$ 3,0 m rajattu kuorma $q_{3,k} = 11$ kPa ja jatkuva kuorma $q_{2,k} = 9$ kPa.

<u>Ei liikennekuormaa -tapauksissa</u> ei ole ollenkaan liikennekuormia. Laskenta tapahtuu siis pelkillä pysyvillä kuormilla. Taulukossa 4.4 on esitetty maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien liikennekuormavaihtoehdot.

Taulukko 4.4. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien liikennekuormavaihtoehdot.

Liikennekuorma	<i>q_{1,k}</i> [kPa]	<i>q</i> _{2,k} [kPa]	<i>q_{3,k}</i> [kPa]	<i>B</i> _{q3} [m]
Rautatieliikennekuorma	8	0	76	3,4
Tieliikennekuorma	8	9	11	3,0
Ei liikennekuormia	0	0	0	0

Kulmatukimuuriin pystysuorasti kohdistuvan liikennekuorman $q_{1,k}$ resultantin edustava arvo $Q_{1,rep}$ lasketaan kaavalla

$$Q_{1,rep} = \psi_0 \cdot Q_{1,k} = \psi_0 \cdot q_{1,k} (B-s).$$
(4.36)

Yhdistelykerroin ψ_0 on arvoltaan ψ_0 = 0,75 nykyisen eurokoodin liitteen A2 (EN 1990 2005, s. 106) ja uuden eurokoodin liitteen A.2 (EN 1990 2023, s. 87) mukaisesti, koska kyseessä on tieliikennekuorma.

Liikennekuormat $q_{2,k}$ ja $q_{3,k}$ ja maan tehokas tilavuuspaino aiheuttavat pystyjännitykset $\sigma'_{v,G,k}$ ja $\sigma'_{v,Q,k}$ välittömästi virtuaalipinnan takana. Maanpinnan tasossa tehokas pysyvä pystyjännitys $\sigma'_{v1,G,k}$ on

$$\sigma_{\nu_{1,G,k}}' = 0 \tag{4.37}$$

ja muuttuva pystyjännitys $\sigma'_{v_{1,Q,k}}$ on

$$\sigma'_{\nu 1,Q,k} = q_{2,k} + q_{3,k}. \tag{4.38}$$

Perustamistasossa tehokas pysyvä pystyjännitys $\sigma'_{v2,G,k}$ on kaavan (3.72) mukaisesti

$$\sigma'_{\nu 2.G.k} = \gamma'(H_{muuri} + s) \tag{4.39}$$

ja muuttuva pystyjännitys $\sigma'_{V2,Q,k}$, kun rajatun kuorman $q_{3,k}$ jännityslisäys approksimoidaan Brinch Hansenin 2:1-menetelmällä, on

$$\sigma'_{\nu 2,Q,k} = q_{2,k} + q_{3,k} \frac{B_{q_3}}{B_{q_3} + z} = q_{2,k} + q_{3,k} \frac{B_{q_3}}{B_{q_3} + H_{muuri} + s}.$$
(4.40)

Mahdollisen virtaamattoman huokosveden huokosvedenpaineen ominaisarvo perustamistasossa virtuaalipinnan takana $u_{2,k}$, joka on pysyvä kuorma. Se lasketaan kaavalla

$$u_{2,k} = \gamma_w (H_{muuri} + s).$$
 (4.41)

4.3.3 Mitoituskuormat

Kantokestävyysehtoa (2.31) ja liukumiskestävyysehtoa (2.32) varten on laskettava mitoitusarvot N_d ja T_d taulukon 4.3 mitoitustapamatriisin kaikissa tapauksissa.

Pystykuormat

 V_{max} -tapauksissa kulmatukimuuriin pystysuorasti kohdistuvan kuormien vaikutuksen mitoitusarvo N_d ja sen aiheuttaneet pystykuormat tarkastellaan epäedullisina. Mitoitustavoilla DA2 ja DA2* N_d lasketaan kuormitusyhtälöparilla

$$6.10a: N_d = 1,35 \cdot W_k \text{ ja} \tag{4.42}$$

$$6.10b: N_d = 1,25 \cdot W_k + 1,35 \cdot Q_{1,rep}. \tag{4.43}$$

Uusilla mitoitustavoilla VC1, VC3 ja VC4 N_d lasketaan kuormitusyhtälöparilla

$$8.14a: N_d = \gamma_G \cdot W_k \text{ ja} \tag{4.44}$$

$$8.14b: N_d = \gamma_E[\xi \gamma_G \cdot W_k + \gamma_Q \cdot Q_{1,rep}], \tag{4.45}$$

joissa osavarmuusluvut γ_G , γ_Q ja γ_E saadaan taulukosta 2.5. Pienennyskerroin on ξ = 0,85. Kuitenkin tulo $\xi\gamma_G$ ei ole alle 1,0. Mitoitustavalla VC4 ei käytetä pienennyskerrointa ξ (ks. luku 2.4.2).

 V_{min} -tapauksissa mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3 N_d :n aiheuttaneet pystykuormat tarkastellaan edullisina, joten N_d lasketaan kuormitusyhtälöpareilla

$$6.10a: N_d = 0.9 \cdot W_k \text{ ja } 6.10b: N_d = 0.9 \cdot W_k \text{ ja}$$
(4.46)

$$8.14a: N_d = 1,0 \cdot W_k \text{ ja } 8.14b: N_d = 1,0 \cdot W_k. \tag{4.47}$$

Mitoitustavoilla DA2* ja VC4 N_d tarkastellaan epäedullisena, joten N_d lasketaan kuormitusyhtälöpareilla

$$6.10a: N_d = 1,35 \cdot W_k \text{ ja } 6.10b: N_d = 1,25 \cdot W_k \text{ ja}$$
(4.48)

$$8.14a: N_d = 1,35 \cdot W_k \text{ ja } 8.14b: N_d = 1,35 \cdot W_k. \tag{4.49}$$

Vaakakuormat

<u>Mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3</u> osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin eli pystyjännityksiin $\sigma'_{v,G,k}$ ja $\sigma'_{v,Q,k}$ sekä huokosvedenpaineeseen $u_{2,k}$. Kulmatukimuuriin kohdistuvan vaakaresultantin mitoitusarvo T_d on lepopaineen resultantin mitoitusarvo $P_{0,d}$ ja mahdollisen huokosvedenpaineen resultantin mitoitusarvon $P_{u,d}$ summa

$$T_d = P_{0,d} + P_{u,d}. ag{4.50}$$

Lepopaineen resultantin mitoitusarvo $P_{0,d}$ lasketaan puolisuunnikaskuormituksen (lepopaineen p_0 ja huokosvedenpaineen u summa, keltainen ja sininen alue kuvassa 4.5) kaavalla

$$P_{0,d} = (p_{01,d} + p_{02,d})(H_{muuri} + s)/2.$$
(4.51)

Huokosvedenpaineen resultantin mitoitusarvon $P_{u,d}$ lasketaan kaavalla

$$P_{u,d} = u_{2,d}(H_{muuri} + s)/2.$$
(4.52)

Lepopaineen mitoitusarvo maanpinnassa $p_{01,d}$ on kaavan (3.67) mukaisesti

$$p_{01,d} = \sigma'_{\nu 1,d} K_0, \tag{4.53}$$

ja lepopaineen mitoitusarvo perustamistasossa $p_{02,d}$ on

$$p_{02,d} = \sigma'_{\nu_{2,d}} K_0. \tag{4.54}$$

Tehokas pystyjännitys maanpinnan tasossa σ'_{v1} ja tehokas pystyjännitys perustamistasossa σ'_{v2} sekä huokosvedenpaine perustamistasossa u_2 ovat aina epäedullisia. Mitoitustavalla DA2 mitoitusarvo $\sigma'_{v1,d}$ lasketaan kuormitusyhtälöparilla

$$6.10a: \sigma_{v1,d}' = 0 \text{ ja} \tag{4.55}$$

$$6.10b: \sigma'_{v1,d} = \gamma_Q \cdot \sigma'_{v1,Q,k} \tag{4.56}$$

ja mitoitusarvot $\sigma'_{v_{2,d}}$ ja $u_{2,d}$ lasketaan kuormitusyhtälöparilla

$$6.10a: \sigma_{\nu2,d}' = 1,35 \cdot \sigma_{\nu2,G,k}' \text{ ja } u_{2,d} = 1,35 \cdot u_{2,k}, \tag{4.57}$$

$$6.10b: \sigma_{\nu2,d}' = 1,25 \cdot \sigma_{\nu2,G,k}' + \gamma_Q \cdot \sigma_{\nu2,Q,k}' \text{ ja } u_{2,d} = 1,25 \cdot u_{2,k}, \tag{4.58}$$

joissa tieliikennekuormalle on γ_Q = 1,35 ja raideliikennekuormalle γ_Q = 1,45. Mitoitustavoilla VC1 ja VC3 $\sigma'_{v_{1,d}}$ lasketaan kuormitusyhtälöparilla

8.14*a*:
$$\sigma'_{v1,d} = 0$$
 ja (4.59)

$$8.14b: \sigma'_{v1,d} = \gamma_Q \cdot \sigma'_{v1,Q,k} \tag{4.60}$$

ja $\sigma'_{v2,d}$ ja $u_{2,d}$ lasketaan kuormitusyhtälöparilla

8.14*a*:
$$\sigma'_{v2,d} = \gamma_G \cdot \sigma'_{v2,G,k}$$
 ja $u_{2,d} = \gamma_{Gw} \cdot u_{2,k}$, (4.61)

8.14b:
$$\sigma'_{v2,d} = \xi \gamma_G \cdot \sigma'_{v2,G,k} + \gamma_Q \cdot \sigma'_{v2,Q,k}$$
 ja $u_{2,d} = \xi \gamma_{Gw} \cdot u_{2,k}$, (4.62)

joissa osavarmuusluvut γ_G , γ_{Gw} ja γ_Q saadaan taulukosta 2.5. Pienennyskerroin on ξ = 0,85. Kuitenkin tulo $\xi\gamma_G$ tai $\xi\gamma_{Gw}$ ei ole alle 1,0.

<u>Mitoitustavalla DA2*</u> osavarmuusluvut kohdistetaan kuormien vaikutuksiin eli lepopaineen resultanttiin $P_{0,k}$ ja huokosvedenpaineen resultanttiin $P_{u,k}$ Väyläviraston soveltamisohjeen (NCCI 7 2023, s. 25) mukaan siten, että ensin lasketaan lepopaineen resultantti laskettuna pelkillä pysyvillä kuormilla $P_{0,G,k}$ kaavalla

$$P_{0,G,k} = (p_{01,G,k} + p_{02,k})(H_{muuri} + s)/2 = K_0(0 + \sigma'_{\nu 2,G,k})(H_{muuri} + s)/2,$$
(4.63)

jonka jälkeen lasketaan lepopaineen resultantti laskettuna pysyvillä ja muuttuvilla kuormilla $P_{0,k}$ kaavalla

$$P_{0,k} = (p_{01,k} + p_{02,k})(H_{muuri} + s)/2 = (\sigma'_{v1,k} + \sigma'_{v2,k})(H_{muuri} + s)/2.$$
(4.64)

ja näiden erotuksesta saadaan lepopaineen resultantti pelkillä muuttuvilla kuormilla $P_{0,Q,k}$ kaavalla

$$P_{0,Q,k} = P_{0,k} - P_{0,G,k}.$$
(4.65)

Huokosvedenpaineen resultantti $P_{u,k}$, joka aiheutuu pelkistä pysyvistä kuormista, lasketaan kaavalla

$$P_{u,k} = u_{2,k}(H_{muuri} + s)/2.$$
(4.66)

Maanpinnan tasossa ja perustamistasossa tehokkaat pystyjännitykset $\sigma'_{v1,k}$ ja $\sigma'_{v2,k}$ ovat

$$\sigma'_{v1,k} = \sigma'_{v1,Q,k}$$
 ja (4.67)

$$\sigma'_{\nu2,k} = \sigma'_{\nu2,G,k} + \sigma'_{\nu2,Q,k}, \tag{4.68}$$

Kulmatukimuuriin kohdistuvan vaakaresultantin mitoitusarvo T_d lasketaan mitoitustavalla DA2* kuormitusyhtälöparilla

$$6.10a: T_d = 1,35 \cdot (P_{0,G,k} + P_{u,k})$$
 ja (4.69)

$$6.10b: T_d = 1,25 \cdot (P_{0,G,k} + P_{u,k}) + \gamma_Q \cdot P_{0,Q,k}, \tag{4.70}$$

joissa $\gamma_Q = 1,35$ maantieliikennekuorman tapauksissa ja $\gamma_Q = 1,45$ rautatieliikennekuorman tapauksissa.

<u>Mitoitustavalla VC4</u> osavarmuusluvut kohdistetaan muuttuviin kuormiin $\sigma'_{v1,Q,k}$ ja $\sigma'_{v2,Q,k}$ ja kuormien vaikutuksiin, jotka ovat lepopaineen resultantti laskettuna pelkillä pysyvillä kuormilla $P_{0,G,k}$, lepopaineen resultantti laskettuna pysyvillä ja muuttuvilla kuormilla $P_{0,k}$ ja huokosvedenpaineen resultantti $P_{u,k}$. Näiden mitoitusarvot $P_{0,G,d}$, $P_{0,d}$ ja $P_{u,d}$ lasketaan kaavoilla

$$P_{0,G,d} = (p_{01,G,k} + p_{02,k})(H_{muuri} + s)/2 = K_0(0 + \sigma'_{\nu 2,G,k})(H_{muuri} + s)/2,$$
(4.71)

$$P_{0,d} = (p_{01,d} + p_{02,d})(H_{muuri} + s)/2 = K_0(\sigma'_{v1,d} + \sigma'_{v2,d})(H_{muuri} + s)/2.$$
(4.72)

$$P_{u,d} = u_{2,k}(H_{muuri} + s)/2.$$
(4.73)

Maanpinnan tasossa ja perustamistasossa tehokkaiden pystyjännitysten mitoitusarvot $\sigma'_{v1,d}$ ja $\sigma'_{v2,d}$ lasketaan kaavoilla

$$\sigma'_{v1,d} = \sigma'_{v1,G,k} + \sigma'_{v1,Q,d} = 0 + \gamma_{Q,red} \cdot \sigma'_{v1,Q,k} \text{ ja}$$
(4.74)

$$\sigma'_{\nu2,d} = \sigma'_{\nu2,G,k} + \sigma'_{\nu2,Q,d} = \sigma'_{\nu2,G,k} + \gamma_{Q,red} \cdot \sigma'_{\nu2,Q,k}, \tag{4.75}$$

joissa osavarmuusluku $\gamma_{Q,red}$ = 1,0 maantieliikennekuorman tapauksissa ja $\gamma_{Q,red}$ = 1,074 rautatieliikennekuorman tapauksissa. Mitoitustavalla VC4 T_d lasketaan kuormitusyhtälöparilla

8.14*a*:
$$T_d = 1,35 \cdot (P_{0,G,d} + P_{u,d})$$
 ja (4.76)

$$8.14b: T_d = 1,35 \cdot (P_{0,d} + P_{u,d}). \tag{4.77}$$

Lepopainekerroin lasketaan kaavalla (3.68) käyttäen mitoitustavoilla DA2, DA2*, VC4+M1, VC1+RFA ja VC4+RFA kitkakulman ominaisarvoa φ'_k ja mitoitustavoilla VC3+M2 ja VC1+M2 kitkakulman mitoitusarvoa φ'_d .

4.3.4 Epäkeskisyyden laskenta

Laskentatapauksissa epäkeskisyyttä on vain perustuksen leveyden B suunnassa. Epäkeskisyyden e_B on toteutettava momenttitasapainoyhtälö

$$T \cdot y - N \cdot x = N \cdot e_B, \tag{4.78}$$

jossa *x* on pystyresultantin *N* sijainti tukimuurin pohjan keskipisteestä, ja *y* on vaakaresultantin *T*:n pystyetäisyys tukimuurin pohjan keskipisteestä. Tarkistettaessa epäkeskisyysehtoja " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " ja (2.22) pystyresultantti *N* tarkastellaan edullisena. Laskettaessa tehokasta leveyttä *B*' kaavalla (3.12) pystyresultantti *N* tarkastellaan *Vmin*-tapauksissa edullisena, mutta *Vmax*-tapauksissa epäedullisena. Mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3 pystyresultantin *N* edullisena tarkastelu tarkoittaa edullisen kuorman osavarmuuslukujen kohdentamista pystykuormiin ja epäedullisena tarkastelu epäedullisen kuorman osavarmuuslukujen kohdentamista pystykuormiin. Mitoitustavoilla DA2* ja VC4 pystyresultantin *N* edullisena tarkastelu tarkoittaa laskemista ilman muuttuvia kuormia ja epäedullisena tarkastelu laskemista muuttuvien kuormien kanssa.

<u>Mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3</u> epäkeskisyys e_B lasketaan kaavalla

$$e_{B,d} = \frac{T_d \cdot y_d - N_d \cdot x_d}{N_d}.$$
(4.79)

Kaavassa (4.79) T_d lasketaan kaavan (4.50) mukaisesti. N_d lasketaan tehokasta leveyttä *B*' varten *Vmin*-tapauksissa kaavapareilla (4.46) ja (4.47) ja *Vmax*-tapauksissa kaavoilla (4.42) – (4.45). Mitoitustapojen VC1 ja VC3 epäkeskisyysehtoa " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " varten N_d lasketaan kaavaparilla (4.47). Sijainti x_d lasketaan *Vmin*-tapauksien tehokasta leveyttä *B*' ja mitoitustapojen VC1 ja VC3 epäkeskisyysehtoa " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " varten kaavalla

$$x_{d} = \frac{\gamma_{G}(W_{muuri,k}x_{muuri}+W_{pohja,k}x_{pohja}+W_{taustatäyttö,k}x_{taustatäyttö})}{\gamma_{G}\cdot W_{k}}$$
$$= \frac{W_{muuri,k}x_{muuri}+W_{pohja,k}x_{pohja}+W_{taustatäyttö,k}x_{taustatäyttö}}{W_{k}}.$$
(4.80)

Sijainti x_d lasketaan Vmax-tapauksien tehokasta leveyttä B' varten kaavalla

$$x_{d} = \frac{\gamma_{G}(W_{muuri,k}x_{muuri}+W_{pohja,k}x_{pohja}+W_{taustatäyttö,k}x_{taustatäyttö})+\gamma_{Q}Q_{1,rep}x_{Q1}}{\gamma_{G}W_{k}+\gamma_{Q}Q_{1,rep}},$$
(4.81)

jossa

- mitoitustavalla DA2 kuormitusyhtälöllä 6.10a on γ_G = 1,35 ja γ_Q = 0 ja kuormitusyhtälöllä 6.10b on γ_G = 1,25 ja γ_Q = 1,35,
- mitoitustavalla VC1 kuormitusyhtälöllä 8.14a on γ_G = 1,35 ja γ_Q = 0 ja kuormitusyhtälöllä 8.14b on γ_G = 1,15 ja γ_Q = 1,35 ja
- mitoitustavalla VC3 kuormitusyhtälöllä 8.14a on γ_G = 1,0 ja γ_Q = 0 ja kuormitusyhtälöllä 8.14b on γ_G = 1,0 ja γ_Q = 1,15.

 W_k , $W_{muuri,k}$, $W_{pohja,k}$ ja $W_{taustatäyttö,k}$ lasketaan kaavoilla (4.31) – (4.34). Voimien $W_{muuri,k}$, $W_{pohja,k}$, $W_{taustatäyttö,k}$ ja $Q_{1,rep}$ sijainnit tukimuurin pohjan keskipisteestä x_{muuri} , x_{pohja} , $x_{tausta-täyttö}$ ja x_{Q1} lasketaan kaavoilla

$$x_{muuri} = -\frac{B}{2} + \frac{s}{2},\tag{4.82}$$

$$x_{pohja} = 0, (4.83)$$

 $x_{taustatäyttö} = \frac{s}{2} ja$ (4.84)

$$x_{Q1} = \frac{s}{2}.$$
 (4.85)

Pystyetäisyys y_d lasketaan puolisuunnikaskuormituksen (lepopaineen p_0 ja huokosvedenpaineen *u* summa, keltainen ja sininen alue kuvassa 4.5) kaavalla

$$y_d = \frac{H_{muuri} + s}{3} \cdot \frac{2p_{01,d} + p_{02,d} + u_{2,d}}{p_{01,d} + p_{02,d} + u_{2,d}},\tag{4.86}$$

jonka $p_{01,d}$, $p_{02,d}$ ja $u_{2,d}$ lasketaan kaavoilla (4.53) – (4.62).

<u>Mitoitustavoilla DA2* ja VC4</u> epäkeskisyysehtoa (2.22) varten epäkeskisyys e_B lasketaan kaavalla

$$e_{B,k} = \frac{T_k \cdot y_k - N_k \cdot x_k}{N_k} = \frac{(P_{0,k} + P_{u,k}) \cdot y_k - W_k \cdot x_k}{W_k},$$
(4.87)

jonka x_k lasketaan kaavalla (4.80) $x_k = x_d$. $P_{0,k}$ lasketaan kaavalla (4.64), $P_{u,k}$ kaavalla (4.66), $Q_{1,rep}$ kaavalla (4.36), W_k kaavalla (4.31) ja y_k kaavalla

$$y_{k} = \frac{H_{muuri} + s}{3} \cdot \frac{2p_{01,k} + p_{02,k} + u_{2,k}}{p_{01,k} + p_{02,k} + u_{2,k}} = \frac{H_{muuri} + s}{3} \cdot \frac{2\sigma'_{\nu1,k}K_{0} + \sigma'_{\nu2,k}K_{0} + u_{2,k}}{\sigma'_{\nu1,k}K_{0} + \sigma'_{\nu2,k}K_{0} + u_{2,k}},$$
(4.88)

jonka $\sigma'_{v_{1,k}}$, $\sigma'_{v_{2,k}}$ ja $u_{2,k}$ lasketaan kaavoilla (4.67), (4.68) ja (4.41). Lepopainekerroin K_0 lasketaan kaavalla (3.68) kitkakulman ominaisarvoa φ'_k .

<u>Mitoitustavalla DA2*</u> epäkeskisyys e_B kuormitusyhtälön 6.10b tehokasta leveyttä B' varten lasketaan *Vmin*-tapauksissa kaavalla (4.87) ja *Vmax*-tapauksissa kaavalla

$$e_{B,k} = \frac{T_k \cdot y_k - N_k \cdot x_k}{N_k} = \frac{(P_{0,k} + P_{u,k}) \cdot y_k - (W_k + Q_{1,rep}) \cdot x_k}{W_k + Q_{1,rep}},$$
(4.89a)

jonka x_k lasketaan kaavalla

$$x_{k} = \frac{W_{muuri,k} x_{muuri} + W_{pohja,k} x_{pohja} + W_{taustatäyttö,k} x_{taustatäyttö} + Q_{1,rep} x_{Q_{1}}}{W_{k} + Q_{1,rep}}.$$
(4.89b)

Kaavoissa (4.89a) ja (4.89b) $P_{0,k}$ lasketaan kaavalla (4.64), $P_{u,k}$ kaavalla (4.66), $Q_{1,rep}$ kaavalla (4.36) ja y_k kaavalla (4.88). W_k , $W_{muuri,k}$, $W_{pohja,k}$ ja $W_{taustatäyttö,k}$ lasketaan kaavoilla (4.31) – (4.34). Sijainnit x_{muuri} , x_{pohja} , $x_{taustatäyttö}$ ja x_{Q1} lasketaan kaavoilla (4.82) – (4.85).

<u>Mitoitustavalla VC4</u> muuttuviin kuormiin kohdistetaan osavarmuusluku $\gamma_{Q,red}$, joka on arvoltaan $\gamma_{Q,red} = 1,0$ maantieliikennekuorman tapauksissa ja $\gamma_{Q,red} = 1,074$ rautatieliikennekuorman tapauksissa. Täten *Vmin*-tapauksissa epäkeskisyys e_B kuormitusyhtälön 8.14b tehokasta leveyttä *B*' varten lasketaan kaavalla

$$e_{B,d} = \frac{T_d \cdot y_d - N_k \cdot x_d}{N_k} = \frac{(P_{0,d} + P_{u,d}) \cdot y_d - W_k \cdot x_d}{W_k}.$$
(4.90a)

Kaavan (4.90a) $P_{0,d}$ lasketaan kaavalla (4.72), $P_{u,d}$ kaavalla (4.73), W_k kaavalla (4.31) ja x_d kaavalla (4.80) ja y_d lasketaan kaavalla

$$y_{d} = \frac{H_{muuri} + s}{3} \cdot \frac{2p_{01,d} + p_{02,d} + u_{2,k}}{p_{01,d} + p_{02,d} + u_{2,k}} = \frac{H_{muuri} + s}{3} \cdot \frac{2K_{0}\sigma_{v1,d}' + K_{0}\sigma_{v2,d}' + u_{2,k}}{K_{0}(\sigma_{v1,d}' + \sigma_{v2,d}') + u_{2,k}},$$
(4.90b)

jonka $\sigma'_{v_{1,d}}$, $\sigma'_{v_{2,d}}$ ja $u_{2,k}$ lasketaan kaavoilla (4.74), (4.74) ja (4.41). Lepopainekerroin K_0 lasketaan kaavalla (3.68) kitkakulman ominaisarvoa φ'_k .

Vmax-tapauksissa epäkeskisyys e_B kuormitusyhtälön 8.14b tehokasta leveyttä B' varten lasketaan kaavalla

$$e_{B,d} = \frac{T_d \cdot y_d - N_k \cdot x_d}{N_k} = \frac{(P_{0,d} + P_{u,d}) \cdot y_d - (W_k + Q_{1,rep}) \cdot x_d}{W_k + Q_{1,rep}},$$
(4.90c)

koska muuttuvan pystykuorman $Q_{1,rep}$ osavarmuusluku on arvoltaan $\gamma_{Q,red}$ = 1,0. Kaavan (4.90c) $P_{0,d}$ lasketaan kaavalla (4.72), $P_{u,d}$ kaavalla (4.73), $Q_{1,rep}$ kaavalla (4.36), W_k kaavalla (4.31) ja y_d kaavalla (4.90d). Sijainti x_d lasketaan kaavalla (4.89b), koska muuttuvan pystykuorman $Q_{1,rep}$ osavarmuusluku on arvoltaan $\gamma_{Q,red}$ = 1,0.

<u>Mitoitustapojen DA2*, VC1, VC3 ja VC4</u> epäkeskisyysehtoa (2.23) varten sekä <u>mitoitus-</u> <u>tapojen DA2* ja VC4</u> kuormitusyhtälöiden 6.10a ja 8.14a tehokasta leveyttä B' varten epäkeskisyys e_B lasketaan kaavalla

$$e_{B,G,k} = \frac{T_k \cdot y_k - N_k \cdot x_k}{N_k} = \frac{(P_{0,G,k} + P_{u,k}) \cdot y_k - W_k \cdot x_k}{W_k},$$
(4.91)

jonka W_k lasketaan kaavalla (4.31), $P_{0,G,k}$ kaavalla (4.63), $P_{u,k}$ kaavalla (4.66), x_k lasketaan kaavalla (4.80) $x_k = x_d$ ja y_k kaavalla

$$y_k = \frac{H_{muuri} + s}{3},\tag{4.92}$$

koska $p_{01,G,k} = \sigma'_{v1,G,k} \cdot K_0$ ja $\sigma'_{v1,G,k} = 0$.

<u>Mitoitustavan VC4+RFA lisäehdon (2.40)</u> *T*:n ja *N*:n (edullinen, *Vmin*) edustavat arvot ovat $T_{rep} = P_{0,k}$ laskettuna kaavalla (4.64) ja $N_{rep} = W_k$ laskettuna kaavalla (4.31).

4.3.5 Kestävyyden laskenta

<u>Kantokestävyyden ominaisarvo $R_{N,k} = R_N$ lasketaan</u> tiiviin moreenin ja löyhän hiekan laskentatapauksissa avoimen tilan kaavalla (3.39), ilman syvyyskertoimia d_c , d_q ja d_γ . Kantokestävyyden ominaisarvo $R_{Nu,k} = R_{Nu}$ lasketaan siltin laskentatapauksissa suljetun tilan kaavalla (3.43), ilman syvyyskerrointa d_{cu} .

Mitoitustavoilla DA2 ja DA2* kantokestävyyden avoimen ja suljetun tilan mitoitusarvot ovat $R_{N,d} = R_{N,k}/1,55$ ja $R_{Nu,d} = R_{Nu,k}/1,55$. Mitoitustavoilla VC1+RFA ja VC4+RFA kantokestävyyden avoimen ja suljetun tilan mitoitusarvot ovat $R_{N,d} = R_{N,k}/1,4$ ja $R_{Nu,d} = R_{Nu,k}/1,4$. Mitoitustavoilla VC4+M1, VC3+M2 ja VC1+M2 kantokestävyyden avoimen ja suljetun tilan mitoitusarvot ovat $R_{N,d} = R_{N,k}/1,4$. Mitoitustavoilla VC4+M1, VC3+M2 ja VC1+M2 kantokestävyyden avoimen ja suljetun tilan mitoitusarvot ovat $R_{N,d} = R_{N,k}$ ja $R_{Nu,d} = R_{Nu,k}$. Nostetta U ei oteta kantokestävyyden laskemisessa huomioon.

Mitoitustavoilla DA2, DA2*, VC4+M1, VC1+RFA ja VC4+RFA käytetään tehokkaasta kitkakulmasta φ' ja suljetusta leikkauslujuudesta c_u ominaisarvoja φ'_k ja $c_{u,k}$. Mitoitustavoilla VC3+M2 ja VC1+M2 käytetään tehokkaasta kitkakulmasta φ' ja suljetusta leikkauslujuudesta c_u mitoitusarvoja φ'_d ja $c_{u,d}$, jotka lasketaan kaavoilla (4.21) ja (4.22).

Tehokkaan leveyden B' kaavan (3.12) epäkeskisyys e_B lasketaan

- mitoitustavalla DA2*
 - o kuormitusyhtälöllä 6.10a kaavan (4.91) mukaisesti,
 - kuormitusyhtälön 6.10b ja 8.14b Vmin-tapauksissa kaavan (4.87) mukaisesti, ja
 - kuormitusyhtälön 6.10b ja 8.14b Vmax-tapauksissa kaavan (4.89a) mukaisesti, ja
- mitoitustavalla VC4
 - o kuormitusyhtälöllä 8.14a kaavan (4.91) mukaisesti,
 - o kuormitusyhtälön 8.14b Vmin-tapauksissa kaavan (4.90a) mukaisesti, ja
 - o kuormitusyhtälön 8.14b Vmax-tapauksissa kaavan (4.90c) mukaisesti, ja
- mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3 kaavan (4.79) mukaisesti.

Kuormakaltevuuskertoimien i_q , i_γ , ja i_{cu} kaavojen (3.14), (3.15) ja (3.49) parametrit T ja N ovat

- mitoitustavalla DA2*
 - kuormitusyhtälöllä 6.10a $T = P_{0,G,k} + P_{u,k}$ laskettuna kaavoilla (4.63) ja (4.66) ja $N = W_k$ laskettuna kaavalla (4.31) ja
 - ∘ kuormitusyhtälöllä 6.10b *Vmax*-tapauksissa $T = P_{0,k} + P_{u,k}$ laskettuna kaavoilla (4.64) ja (4.66) ja $N = W_k + Q_{1,k}$ laskettuna kaavoilla (4.31) ja (4.36) ja
 - kuormitusyhtälöllä 6.10b *Vmin*-tapauksissa $T = P_{0,k} + P_{u,k}$ laskettuna kaavoilla (4.64) ja (4.66) ja $N = W_k$, ja
- mitoitustavalla VC4
 - kuormitusyhtälöllä 8.14a $T = P_{0,G,d} + P_{u,d}$ laskettuna kaavoilla (4.71) ja (4.73) ja $N = W_k$ ja
 - ∘ kuormitusyhtälöllä 8.14b *Vmax*-tapauksissa $T = P_{0,d} + P_{u,d}$ laskettuna kaavoilla (4.72) ja (4.73) ja $N = W_k + \gamma_{Q,red} \cdot Q_{1,rep}$ ja
 - ∘ kuormitusyhtälöllä 8.14b *Vmin*-tapauksissa $T = P_{0,d} + P_{u,d}$ l laskettuna kaavoilla (4.72) ja (4.73) ja $N = W_k$, ja
- mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3 $T = T_d$ ja $N = N_d$ laskettuna kaavoilla (4.50) ja (4.42) (4.47).

<u>Liukumiskestävyys $R_{T,d}$ lasketaan</u> avoimen tilan mitoitustavoilla DA2 ja DA2* kaavalla (2.14), mitoitustavoilla VC4+M1, VC3+M2 ja VC1+M2 kaavalla (2.33), mitoitustavalla VC1+RFA kaavalla (2.34) ja mitoitustavalla VC4+RFA kaavalla (2.35). Myös siltin laskentatapauksissa oletetaan liukumiskestävyydelle avoin tila, koska kulmatukimuuri on murskepatjan päällä. Rakenteen ja maan välinen kitkakulma δ oletetaan yhtä suureksi kuin maan kitkakulma φ' , joten pätee $\delta_k = \delta_{rep} = \varphi'_k$ ja $\delta_d = \varphi'_d$. Noste *U* (epäedullinen) otetaan liukumiskestävyyden laskemisessa huomioon.

Tehokkaan pystykuorman mitoitusarvo V'_{a} on aina edullinen. Mitoitustavalla DA2 se on kaavojen (4.46) ja (4.47) mukaisesti

$$V'_d = N_d - U_d = 0.9 \cdot W_k - u_{2,d} \cdot B, \tag{4.93}$$

jossa $u_{2,d}$ lasketaan kaavoilla (4.57) ja 4.58).

Mitoitustavalla DA2* V'a lasketaan ominaisarvoilla kaavalla

$$V'_{d} = V'_{k} = N_{k} - U_{k} = W_{k} - u_{2,k} \cdot B,$$
(4.94)

jossa $u_{2,k}$ lasketaan kaavalla (4.41).

Pysyvien edullisten pystykuormien mitoitusarvo $N_{G,d,fav}$ on kaavojen (4.48) ja (4.49) mukaisesti

$$N_{G,d,fav} = N_d = 1,0 \cdot W_k$$
 (4.95)

ja noste U_d lasketaan kaavalla

$$U_d = u_{2,d} \cdot B, \tag{4.96}$$

jossa $u_{2,d}$ lasketaan kaavoilla (4.61) ja (4.62).

Pysyvien edullisten pystykuormien edustava arvo $N_{G,rep,fav}$ lasketaan ominaisarvoilla kaavalla

$$N_{G,rep,fav} = N_k = W_k. \tag{4.97}$$

ja noste U_{rep} lasketaan kaavalla

$$U_{rep} = u_{2,k} \cdot B, \tag{4.98}$$

jossa $u_{2,k}$ lasketaan kaavalla (4.41).

4.3.6 Pohjaolosuhteet

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset tiiviissä kuivassa moreenissa on esitetty kuvassa 4.6. Taustatäytön ja moreenin tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on φ'_k = 38°, tehokas koheesio on *c*' = 0 ja tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = \gamma = 19$ kN/m³. Pohjavettä ei ole. Maanpinta ja kulmatukimuurin pohja ovat vaakasuoria. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on *H_{muuri}* = 3,0 m.



Kuva 4.6. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset tiiviissä kuivassa moreenissa.

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset löyhässä kuivassa hiekassa on esitetty kuvassa 4.7. Taustatäytön tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on $\varphi'_k = 38^\circ$, tehokas koheesio on c' = 0 ja tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = \gamma = 19$ kN/m³. Hiekan tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on $\varphi'_k = 32^\circ$, tehokas koheesio on c' = 0 ja tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = 16$ kN/m³. Pohjavettä ei ole. Maanpinta ja kulmatukimuurin pohja ovat vaakasuoria. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on $H_{muuri} = 3,0$ m.



Kuva 4.7. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset löyhässä kuivassa hiekassa.

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset kuivassa mursketäytössä märän siltin päällä on esitetty kuvassa 4.8. Kulmatukimuuri on perustettu ohuelle murskepatjalle. Mursketäytön ja taustatäytön tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on $\varphi'_k = 38^\circ$, tehokas koheesio on c' = 0 ja tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = \gamma = 19$ kN/m³. Siltin suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo on $c_{u,k} = 35$ kPa. Pohjavedenpinta on siltin yläpinnassa ja mursketäyttö on kuiva. Maanpinta ja kulmatukimuurin pohja ovat vaakasuoria. Murskepatjan lujuutta tai painoa ei oteta huomioon kantokestävyyden laskennassa. Tästä johtuva virhe oletetaan merkityksettömän pieneksi eurokoodien nykyisten ja uusien mitoitustapojen vertailussa. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on $H_{muuri} = 2,0$ m.



Kuva 4.8. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset kuivassa mursketäytössä märän siltin päällä.

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa on esitetty kuvassa 4.9. Taustatäytön ja moreenin tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on $\varphi'_k = 38^\circ$, tehokas koheesio on c' = 0, tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$ ja tilavuuspaino $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$. Pohjavesi on kulmatukimuurin takana maanpinnassa virtaamattomassa tilassa. Maanpinta ja kulmatukimuurin pohja ovat vaakasuoria. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on $H_{muuri} = 3,0 \text{ m}$.



Kuva 4.9. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa.

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa on esitetty kuvassa 4.10. Taustatäytön tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on φ'_k = 38°, tehokas koheesio on c' = 0, tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = 12$ kN/m³ ja tilavuuspaino $\gamma = 22$ kN/m³. Hiekan tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on $\varphi'_k = 32°$, tehokas koheesio on c' = 0, tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = 10$ kN/m³ ja tilavuuspaino $\gamma = 20$ kN/m³. Pohjavesi on kulmatukimuurin takana maanpinnassa virtaamattomassa tilassa. Maanpinta ja kulmatukimuurin pohja ovat vaakasuoria. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on $H_{muuri} = 3,0$ m.



Kuva 4.10. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa.

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset vedellä kyllästyneessä mursketäytössä märän siltin päällä on esitetty kuvassa 4.11. Kulmatukimuuri on perustettu ohuelle murskepatjalle. Mursketäytön ja taustatäytön tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on $\varphi'_k = 38^\circ$, tehokas koheesio on c' = 0, tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$ ja tilavuuspaino $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$. Siltin suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo on $c_{u,k} = 35$ kPa. Pohjavesi on kulmatukimuurin takana maanpinnassa virtaamattomassa tilassa. Maanpinta ja kulmatukimuurin pohja ovat vaakasuoria. Murskepatjan lujuutta tai painoa ei oteta huomioon kantokestävyyden laskennassa. Tästä johtuva virhe oletetaan merkityksettömän pieneksi eurokoodien nykyisten ja uusien mitoitustapojen vertailussa. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on $H_{muuri} = 2,0$ m.



Kuva 4.11. Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset vedellä kyllästyneessä mursketäytössä siltin päällä.

4.4 Nosturin tukijalka maanvaraisesti (GEO)

Maanvaraiselle nosturin tukijalalle mitoitetaan maksimipystykuorma Q_V (muuttuva kuorma) kantokestävyyden murtorajatilassa (GEO). Liukumiskestävyyttä ei tarkisteta, koska vaakakuormia ei ole. Mitoitus tehdään kerroksellisessa maassa, jossa täyttökerros koostuu karkearakeisesta murskeesta ja pohjamaa pehmeästä savesta. Tukijalan pohja on neliö ja leveydeltään *B*. Mitoitus tehdään laskemalla maksimipystykuorma Q_V kolmella

eri täyttökerrospaksuuden D_1 ja tukijalan leveyden *B* yhdistelmällä. Kaikki mitoitukset tehdään kahdella eri saven lujuudella. Laskentatapauksia on siis kuusi.

Alaluvussa 4.4.1 esitetään maanvaraisen nosturin tukijalan laskentatapauksien mitoitustavat, laskentamatriisi ja mitoitusehdot. Alaluvussa 4.4.2 esitetään laskentatapauksien laskent geometria, maaparametrit ja kuormien laskenta. Alaluvussa 4.4.3 esitetään laskentatapauksien kestävyyksien laskenta.

4.4.1 Mitoitustavat ja mitoitusehdot

Maanvaraisen nosturin tukijalan laskentatapaukset mitoitetaan Suomessa nykyisin käytettävillä mitoitustavoilla DA2 ja DA2* (ks. luku 2.3) sekä uusilla mitoitustavoilla eli taulukon 2.3 yhdistelmillä (a), (b), (c), (d) ja (e). Taulukon 2.3 yhdistelmät on määritetty uuden eurokoodi 7:n luonnoksessa (prEN 1997-3 2022, s. 76–78) antura- ja laattaperustusten kantokestävyyden mitoittamiseen. Nosturin tukijalka oletetaan tässä työssä kuormansiirtorakenteeksi, joka on geoteknisesti tarpeeksi lähellä anturaperustusta kantokestävyyden mitoituksessa, jotta taulukon 2.3 yhdistelmiä voidaan sille soveltaa. Maanvaraisen nosturin tukijalan laskentatapaukset mitoitetaan siis seitsemällä mitoitustavalla.

Nykyisille mitoitustavoille on tässä työssä valittu käytettävän Ympäristöministeriön kuormitusyhtälöä 6.10b (2.20) ja uusille mitoitustavoille kuormitusyhtälöä 8.14b (2.30). Kuormitusyhtälöitä 6.10a ja 8.14a ei käytetä, koska pysyviä kuormia ei ole. Pystykuormat tarkastellaan vain epäedullisina tapauksina (V_{max}), koska vaakakuormia ei ole. Maanvaraisen nosturin tukijalan mitoitustapamatriisi on esitetty taulukossa 4.4.

Mitoitustapa	V _{max}
DA2	6.10b
DA2*	6.10b
(a) VC1+M1	8.14b
(b) VC3+M2	8.14b
(c) VC1+M2	8.14b
(d) VC1+RFA	8.14b
(e) VC4+RFA	8.14b

Taulukko 4.4. Mitoitustapamatriisi maanvaraiselle nosturin tukijalalle.

Laskentatapauksissa maksimoidaan muuttuva pystykuorma Q_V iterointitarkkuudella 1 kN niin, että toteutuu kantokestävyysehto (2.31) " $N_d \leq R_{Nd}$ ".

4.4.2 Laskentageometria, maaparametrit ja kuormat

Maanvaraisen nosturin tukijalan laskentatapauksissa tukijalka on perustettu laaja-alaisen täyttökerroksen pintaan eli syvyyteen D = 0 m. Kuivan täyttökerroksen tehokkaan

kitkakulman ominaisarvo on $\varphi'_k = 38^\circ$, tehokas koheesio on c' = 0 ja tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = \gamma = 19$ kN/m³. Täyttökerros on saven päällä. Saven suljetun leikkauslujuuden ominaisarvo on $c_{u,k} = 10$ kPa tai $c_{u,k} = 20$ kPa. Laskennassa ei oteta huomioon nosturin tukijalan omaa painoa. Tukijalan pohjan muoto on neliö eli *L* = *B*.

Laskentatapauksissa tukijalan pohjaan kohdistuu keskeisesti muuttuva ominaispystykuorma $Q_{V,k}$. Kuvassa 4.12 on esitetty maanvaraisen nosturin tukijalan laskentageometria, kun tukijalan pohja on 1,0 m x 1,0 m ja täyttökerroksen paksuus on $D_1 = 1,0$ m. Kuvassa 4.13 on esitetty maanvaraisen nosturin tukijalan laskentageometria, kun tukijalan pohja on 2,0 m x 2,0 m ja täyttökerroksen paksuus on $D_1 = 2,0$ m. Kuvassa 4.14 on esitetty maanvaraisen nosturin tukijalan laskentageometria, kun tukijalan on 1,0 m x 1,0 m ja täyttökerroksen paksuus on $D_1 = 2,0$ m.



Kuva 4.12. Maanvaraisen nosturin tukijalan laskentageometria, kun tukijalan pohja on $1,0 \text{ m} \ge 1,0 \text{ m}$ ja täyttökerroksen paksuus on $D_1 = 1,0 \text{ m}$.



Kuva 4.13. Maanvaraisen nosturin tukijalan laskentageometria, kun tukijalan pohja on 2,0 m x 2,0 m ja täyttökerroksen paksuus on $D_1 = 2,0$ m.



Kuva 4.14. Maanvaraisen nosturin tukijalan laskentageometria, kun tukijalan pohja on 1,0 m x 1,0 m ja täyttökerroksen paksuus on $D_1 = 2,0$ m.

Kantokestävyysehtoa (2.31) varten on laskettava pystykuorman epäedullinen mitoitusarvo N_d taulukon 4.4 mitoitustapamatriisin kaikissa tapauksissa. Mitoitustavoilla DA2 ja DA2* N_d lasketaan kuormitusyhtälöllä

$$6.10b: N_d = 1.5 \cdot Q_{V,k}. \tag{4.99}$$

Uusilla mitoitustavoilla VC1, VC3 ja VC4 N_d lasketaan kuormitusyhtälöllä

$$8.14b: N_d = \gamma_E[\gamma_Q \cdot Q_{V,k}], \tag{4.100}$$

joissa osavarmuusluvut γ_Q ja γ_E saadaan taulukosta 2.5.

4.4.3 Kestävyyden laskenta

Kantokestävyyden ominaisarvo $R_{Nu,k} = R_{Nu}$ suorakaiteiselle perustukselle, joka on perustettu vahvalle karkearakeiselle maakerrokselle, jonka alla on heikko hienorakeinen maakerros, lasketaan suljetun tilan kaavalla (3.65). Lävistysleikkauskerroin K_{ps} määritetään interpoloimalla kuvan 3.11 nomogrammista kantokestävyyssuhteen q_2/q_1 ja tehokkaan maan sisäisen kitkakulman φ' perusteella. Kantokestävyyssuhde q_2/q_1 lasketaan kaavalla (3.62).

Mitoitustavoilla DA2, DA2* kantokestävyyden mitoitusarvo on $R_{Nu,d} = R_{Nu,k}/1,55$. Mitoitustavoilla VC1+RFA ja VC4+RFA kantokestävyyden mitoitusarvo on $R_{Nu,d} = R_{Nu,k}/1,4$. Mitoitustavoilla VC1+M1, VC3+M2 ja VC1+M2 kantokestävyyden mitoitusarvo on $R_{Nu,d} = R_{Nu,k}$. Mitoitustavoilla DA2, DA2*, VC1+M1, VC1+RFA ja VC4+RFA käytetään tehokkaasta kitkakulmasta φ' ja suljetusta leikkauslujuudesta c_u ominaisarvoja φ'_k ja $c_{u,k}$. Mitoitustavoilla VC3+M2 ja VC1+M2 käytetään tehokkaasta kitkakulmasta φ' ja suljetusta leikkauslujuudesta c_u mitoitusarvoja φ'_d ja $c_{u,d}$, jotka lasketaan kaavoilla (4.21) ja (4.22).

Lisäksi tarkistetaan, että pätee $R_{Nu} \leq R_{Nt}$. Ylemmän kerroksen kantokestävyyden resultanttivoima R_{Nt} lasketaan kaavalla (3.66). Mikäli $R_{Nu} \leq R_{Nt}$ ei päde, tukijalan kantokestävyys on R_{Nt} eikä R_{Nu} . Silloin tarkistetaan kuitenkin, että kaavan (3.66) mukainen murtopinta mahtuu kokonaan ylempään maakerrokseen kuvan 3.8b mukaisesti. Tarkistus tehdään määrittämällä murtovyöhykkeen syvyys perustuksen pohjasta z_e (kuva 3.10) nomogrammista (kuva 3.11). Horisontaali- ja vertikaalikuormien suhde on H/V = 0 ja leveys *B* on yhtä kuin tehokas leveys *B'*. Mikäli pätee $z_e > D_1$, murtopinta ei mahdu kokonaan ylempään maakerrokseen ja kantokestävyys painotetulla keskiarvolla $R_{N,bk}$ lasketaan kaavalla

$$R_{N,pk} = \frac{R_{Nt}D_1 + R_{Nu}(z_e - D_1)}{z_e},$$
(4.101)

jossa R_{Nu} lasketaan kaavalla (3.43) perustamissyvyydellä D = 0. Tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on $\varphi'_k = 38$ °, joten $z_e/B = 2,13$. Tässä tutkimuksessa on valittu, että mitoitustavoilla VC3+M2 ja VC1+M2 ei käytetä tehokkaan kitkakulman mitoitusarvoa $\varphi'_d = 32$ °, koska silloin murtovyöhykkeen syvyys z_e olisi pienempi ja kantokestävyys suurempi, jos pätisi $z_e < D_1$ eikä $z_e > D_1$.

4.5 Neliöantura kalliolla (EQU)

Kallionvaraiselle neliöanturalle mitoitetaan minimileveys *B* staattisen tasapainon (EQU) ja liukumiskestävyyden (GEO) murtorajatiloissa. Neliöantura mitoitetaan yhdellä vaakakuormalla. Laskentatapauksia on siis yksi.

Alaluvussa 4.5.1 esitetään kallionvaraisen neliöanturan laskentatapauksen mitoitustavat, ja mitoitusehdot. Alaluvussa 4.5.2 esitetään laskentatapauksen laskentageometria ja kuormien laskenta. Alaluvussa 4.5.3 esitetään liukumiskestävyyden laskenta.

4.5.1 Mitoitustavat ja mitoitusehdot

Kallionvaraisen neliöanturan laskentatapaus mitoitetaan staattisen tasapainon (EQU) osalta Suomessa nykyisin käytettävällä mitoitustavalla (ks. luku 2.5.1) ja uudella mitoitustavalla VC2, josta on kaksi osavarmuuslukusarjaa, VC2(a) ja VC2(b), joista määräävä on epäedullisempi yhdistelmä. Liukumiskestävyyden osalta tarkistus tehdään Suomessa nykyisin käytettävällä mitoitustavalla DA2* ja tätä lähellä olevalla uudella mitoitustavalla VC4+RFA.

Nykyiselle EQU-mitoitustavalle on tässä työssä valittu käytettävän Ympäristöministeriön kuormitusyhtälöä 6.10 eli kaavoja (2.46) ja (2.47) ja uudelle EQU-mitoitustavalle VC2 kuormitusyhtälöä 8.12 (2.26). Liukumiskestävyyden mitoituksessa on tässä työssä valittu käytettävän mitoitustavalla DA2* Ympäristöministeriön kuormitusyhtälöä 6.10b (2.20) ja mitoitustavalla VC4+RFA kuormitusyhtälöä 8.14b (2.30). Kuormitusyhtälöitä 6.10a (2.19) ja 8.14a (2.29) ei tarvita, koska liukumiskestävyyden mitoittavat vaakakuormat ovat muuttuvia kuormia ja pystykuormat edullisia. Pystykuormat tarkastellaan vain edullisina tapauksina (V_{min}), koska molemmissa murtorajatiloissa pystykuormat ovat edullisia. Kallionvaraisen neliöanturan laskentatapaus mitoitetaan siis kahdella mitoitustavalla. Kallionvaraisen neliöanturan mitoitustapamatriisi on esitetty taulukossa 4.5.

Taulukko 4.5. Mitoitustapamatriisi kallionvaraiselle neliöanturalle.

Mitoitustapa	EQU		Liukuminen	
Nykyinen EQU	6.10		DA2*, 6.10b	
Uusi EQU VC2	VC2(a), 8.12	VC2(b), 8.12	VC4+RFA, 8.14b	

Laskentatapauksessa leveys *B* minimoidaan iterointitarkkuudella 0,1 m niin, että toteutuu staattisen tasapainon ehto (2.41) " $E_{dst,d} \leq E_{stb,d}$ " ja liukumiskestävyysehto (2.32) " T_d $\leq R_{Td}$ ". Mitoitusleikkauskestävyyttä $R_{EQU,d}$ on ei oteta huomioon tämän työn laskentatapauksissa.

4.5.2 Laskentageometria ja kuormat

Kallionvaraisen neliöanturan laskentatapauksessa neliöantura on perustettu kallionpintaan eli syvyyteen D = 0 m ja sen pilarin paksuus on b = 0,5 m ja anturan paksuus on d= 0,5 m. Kallionpinta ja perustuksen pohjat ovat vaakasuoria. Perustukseen kohdistuu keskeisesti pysyvä ominaispystykuorma $G_{V,k} = 1000$ kN, muuttuva ominaispystykuorma $Q_{V,k} = 250$ kN ja pilariin leveyden B suuntaisesti kohdistuva muuttuva ominaisvaakakuorma $Q_{H,k} = 150$ kN korkeudella h = 4,0 m. Laskennassa otetaan huomioon myös neliöanturan painon ominaisarvo $W_{antura,k}$ ja pilarin painon ominaisarvo $W_{pilari,k}$ (korkeuteen h = 4,0 m asti), joiden summa W_k lasketaan kaavalla

$$W_k = W_{antura,k} + W_{pilari,k}.$$
(4.102)

Ominaisarvot Wantura, k ja Wpilari, k lasketaan kaavoilla

$$W_{antura,k} = \gamma_b dB^2 \text{ ja} \tag{4.103}$$

 $W_{pilari,k} = \gamma_b (h-d) b^2, \tag{4.104}$

joissa betonin tilavuuspaino on γ_b = 25 kN/m³. Kuvassa 4.15 on esitetty kallionvaraisen neliöanturan laskentageometria ja kuormat.



Kuva 4.15. Kallionvaraisen neliöanturan laskentageometria ja kuormat.

Staattinen tasapainon tarkastelu tehdään vaakakuorman Q_H suunnassa anturan alakulman ympäri (kuvassa 4.15 oikea alakulma), koska kallio oletetaan tässä murtumattomaksi.

<u>Kaatavien kuormien vaikutuksen eli kaatavan momentin mitoitusarvo *E_{dst.d}* lasketaan nykyisellä EQU-mitoitustavalla kuormitusyhtälöllä</u>

$$6.10: E_{dst,d} = 1,5 \cdot Q_{H,k} \cdot h, \tag{4.105}$$

mitoitustavalla VC2(a) kuormitusyhtälöllä

$$8.12: E_{dst,d} = 1,5 \cdot Q_{H,k} \cdot h, \tag{4.106}$$

ja mitoitustavalla VC2(b) kuormitusyhtälöllä

$$8.12: E_{dst,d} = 1,5 \cdot Q_{H,k} \cdot h. \tag{4.107}$$

<u>Vakauttavien kuormien vaikutuksen eli vakauttavan momentin mitoitusarvo *E*_{stb.d} lasketaan nykyisellä EQU-mitoitustavalla kuormitusyhtälöllä</u>

$$6.10: E_{stb,d} = 0.9 \cdot (G_{V,k} + W_k), \tag{4.108}$$

mitoitustavalla VC2(a) kuormitusyhtälöllä

$$8.12: E_{stb,d} = 1,0 \cdot (G_{V,k} + W_k), \tag{4.109}$$

ja mitoitustavalla VC2(b) kuormitusyhtälöllä

$$8.12: E_{stb,d} = 1,0 \cdot (G_{V,k} + W_k). \tag{4.110}$$

Laskettaessa mitoitusarvoja $E_{dst,d}$ ja $E_{stb,d}$ tässä laskentatapauksessa mitoitustavoilla VC2(a) ja VC2(b) ei siis ole mitään eroa.

Liukumiskestävyyden murtorajatilaa varten laskettava vaakasuoraan perustuksen pohjaan kohdistuvan mitoituskuorma T_d on epäedullinen. Mitoitustavalla DA2* T_d laske-taan kuormitusyhtälöllä

$$6.10b: T_d = 1,5 \cdot Q_{H,k}. \tag{4.111}$$

Mitoitustavoilla VC4 T_d lasketaan kuormitusyhtälöllä

$$8.14b: T_d = 1,5 \cdot Q_{H,k}. \tag{4.112}$$

4.5.3 Liukumiskestävyyden laskenta

<u>Liukumiskestävyys R_T lasketaan</u> avoimen tilan mitoitustavalla DA2* kaavalla (2.14) ja mitoitustavalla VC4+RFA kaavalla (2.35). Rakenteen ja kallion välinen kitkakulman ominaisarvo δ_k = 45° on Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeen (NCCI 7 2023, s. 44) mukainen ja ominaisarvo on yhtä kuin edustava arvo δ_{rep} .

Tehokkaan pystykuorman mitoitusarvo V'_d on aina edullinen. Mitoitustavalla DA2* V'_d lasketaan ominaisarvoilla kaavalla

$$V'_d = V'_k = N_k = G_{V,k} + W_k. ag{4.113}$$

Mitoitustavalla VC4 pysyvien edullisten pystykuormien edustava arvo $N_{G,rep,fav}$ lasketaan ominaisarvoilla kaavalla

$$N_{G,rep,fav} = N_k = G_{V,k} + W_k.$$
(4.114)

Nostetta U ei ole ja nosteen mitoitusarvo ja edustava arvot ovat $U_d = 0$ ja $U_{rep} = 0$.

4.6 Kulmatukimuuri kalliolla (EQU)

Kallionvaraiselle kulmatukimuurille mitoitetaan minimileveys *B* staattisen tasapainon (EQU) ja liukumiskestävyyden (GEO) murtorajatiloissa. Kulmatukimuuri mitoitetaan kolmella eri liikennekuormalla tuettavan maan päällä. Laskentatapauksia on siis kolme.

Alaluvussa 4.6.1 esitetään kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien mitoitustavat, ja mitoitusehdot. Alaluvussa 4.6.2 esitetään laskentatapauksien laskentageometria ja kuormien laskenta. Alaluvussa 4.6.3 esitetään laskentatapauksien liukumiskestävyyden laskenta.

4.6.1 Mitoitustavat ja mitoitusehdot

Kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset mitoitetaan staattisen tasapainon (EQU) osalta Suomessa nykyisin käytettävällä mitoitustavalla (ks. luku 2.5.1) ja uudella mitoitustavalla VC2, josta on kaksi osavarmuuslukusarjaa, VC2(a) ja VC2(b), joista käytetään epäedullisempaa yhdistelmää. Liukumiskestävyyden osalta tarkistus tehdään Suomessa nykyisin käytettävällä mitoitustavalla DA2* ja tätä lähellä olevalla uudella mitoitustavalla VC4+RFA.

Nykyiselle EQU-mitoitustavalle on valittu tässä työssä käytettävän Liikenne- ja viestintäministeriön kuormitusyhtälöä 6.10 eli kaavoja (2.44) ja (2.45) ja uudelle EQU-mitoitustavalle VC2 kuormitusyhtälöä 8.12 (2.26). Liukumiskestävyyden mitoituksessa käytetään mitoitustavalla DA2* LVM:n kuormitusyhtälöparia 6.10a (2.17) ja 6.10b (2.18) ja mitoitustavalla VC4+RFA kuormitusyhtälöparia 8.14a (2.29) ja 8.14b (2.30). Pystykuormat tarkastellaan vain edullisina tapauksina (V_{min}), koska molemmissa murtorajatiloissa pystykuormat ovat edullisia. Nykyisellä EQU-mitoitustavalla on tässä työssä valittu mitoitettavan minimileveys *B* sekä NCCI 7:n pysyvien kaatavien voimien mallikertoimella γ_{MK} = 1,20 että ilman mallikerrointa. Uudella EQU-mitoitustavalla VC2 on tässä työssä valittu mitoitettavan minimileveys *B* molemmilla maan lujuuden osavarmuuslukusarjoilla M1 ja M2 (taulukko 2.7). Kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset mitoitetaan siis neljällä mitoitustavalla. Kallionvaraisen kulmatukimuurin mitoitustapamatriisi on esitetty taulukossa 4.6.

$\gamma_{MK} = 1,20$						
Mitoitustapa	EQU		Liukuminen			
Nykyinen EQU, mk	6.10, mallikerr	roin	DA2*, 6.10a	DA2*, 6.10b		
Nykyinen EQU, ei mk	6.10, ei mallikerrointa		DA2*, 6.10a	DA2*, 6.10b		
Uusi EQU VC2+M2	VC2(a), 8.12	VC2(b), 8.12	VC4+RFA, 8.14a	VC4+RFA, 8.14b		
Uusi EQU VC2+M1	VC2(a), 8,12	VC2(b), 8,12	VC4+RFA, 8,14a	VC4+RFA, 8,14b		

Taulukko 4.6. Mitoitustapamatriisi kallionvaraiselle kulmatukimuurille. Lyhenne "mk" tarkoittaaNCCI 7:n EQU-murtorajatilan pysyvien kaatavien voimien mallikerrointa $\gamma_{MK} = 1, 20$.

Laskentatapauksissa leveys *B* minimoidaan iterointitarkkuudella 0,1 m niin, että toteutuu staattisen tasapainon ehto (2.41) " $E_{dst,d} \leq E_{stb,d}$ " ja liukumiskestävyysehto (2.32) " $T_d \leq R_{Td}$ ". Mitoitusleikkauskestävyyttä $R_{EQU,d}$ on ei oteta huomioon tämän työn laskentatapauksissa.

4.6.2 Laskentageometria ja kuormat

Kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien laskentageometria ja kuormat on esitetty kuvassa 4.16. Perustamissyvyys on D = 0 m, koska täyttöä tukimuurin edessä ei ole ja Prandtlin teorian mukainen murtopinta on kulmatukimuurin alta sen etupuolelle. Kallionpinta ja perustuksen pohjat ovat vaakasuoria. Kulmatukimuurin seinän ja pohjan paksuus on *s* = 0,30 m. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on H_{muuri} = 3,0 m. Kulmatukimuurin ja sen taustatäytön muodostamaan kappaleeseen, joka rajautuu kuvassa 4.5 katkoviivaan ja joka oletetaan jäykäksi kappaleeksi, kohdistuu vaakakuorma *T* = *P*₀.



Kuva 4.16. Kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentageometria ja kuormat. Liikennekuormien q₁, q₂ ja q₃ ominaisarvot eri kuormatapauksissa on esitetty taulukossa 4.4.

Kulmatukimuurin pystymuurin painon ominaisarvo $W_{muuri,k}$, pohjalaatan painon ominaisarvo $W_{pohja,k}$ ja kulmatukimuurin taustatäytön (kuvassa 4.16 katkoviivaan asti) ominaisarvo $W_{taustatäyttö,k}$ lasketaan kaavoilla (4.32), (4.33) ja (4.34). Näiden summa W_k lasketaan kaavalla (4.31). Taustatäytön ja täytön tehokkaan kitkakulman ominaisarvo on φ'_k = 38°, tehokas koheesio on *c*' = 0 ja tehokas tilavuuspaino on $\gamma' = \gamma = 19$ kN/m³. Pohjavettä ei ole. Betonin tilavuuspaino on $\gamma_b = 25$ kN/m³.

Kolme eri liikennekuorman tapausta ovat samat kuin maanvaraisen kulmatukimuurin tapauksissa. Liikennekuormat ja niiden mallintamiseen käytettyjen ominaiskuormien $q_{1,k}$, $q_{2,k}$ ja $q_{3,k}$ laskenta on esitetty luvussa 4.3.2. Pystykuormat tarkastellaan vain edullisina tapauksina (V_{min}), joten kulmatukimuuriin pystysuorasti kohdistuva ominaiskuorma $q_{1,k}$ ei vaikuta mitoitukseen.

Staattinen tasapainon tarkastelu tehdään kulmatukimuurin etukulman ympäri (kuvassa 4.16 tukimuuri vasen alakulma), koska kallio oletetaan murtumattomaksi.

$$E_{dst,d} = P_{0,d} \cdot y_d, \tag{4.115}$$

jossa pystyetäisyys y_d lasketaan kaavalla

$$y_d = \frac{H_{muuri+s}}{3} \cdot \frac{2p_{01,d} + p_{02,d}}{p_{01,d} + p_{02,d}},\tag{4.116}$$

lepopaineen resultantin mitoitusarvo Po,d lasketaan kaavalla

$$P_{0,d} = (p_{01,d} + p_{02,d})(H_{muuri} + s)/2,$$
(4.117)

lepopaineen mitoitusarvo maanpinnassa $p_{O1,d}$ lasketaan kaavalla

$$p_{01,d} = \sigma'_{v1,d} K_0, \tag{4.118}$$

ja lepopaineen mitoitusarvo perustamistasossa $p_{02,d}$ lasketaan kaavalla

$$p_{02,d} = \sigma'_{\nu_{2,d}} K_0. \tag{4.119}$$

Nykyisellä EQU-mitoitustavalla tehokkaan pystyjännityksen mitoitusarvo maanpinnan tasossa $\sigma'_{v1,d}$ ja perustamistasossa $\sigma'_{v2,d}$, kun käytetään Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeen (NCCI 7 2023, s. 78) mukaista kaatavien pysyvien kuormien mallikerrointa γ_{MK} = 1,20, lasketaan kuormitusyhtälöillä

$$6.10: \sigma'_{v_{1,d}} = \gamma_Q \cdot \sigma'_{v_{1,Q,k}}, \tag{4.120}$$

$$6.10: \sigma_{\nu_{2,d}}' = 1,20 \cdot 1,15 \cdot \sigma_{\nu_{2,G,k}}' + \gamma_Q \cdot \sigma_{\nu_{2,Q,k}}', \tag{4.121}$$

ja ilman mallikerrointa kuormitusyhtälöillä

$$6.10: \sigma'_{v1,d} = \gamma_Q \cdot \sigma'_{v1,Q,k}, \tag{4.122}$$

$$6.10: \sigma_{\nu_{2,d}}' = 1,15 \cdot \sigma_{\nu_{2,G,k}}' + \gamma_Q \cdot \sigma_{\nu_{2,Q,k}}'. \tag{4.123}$$

Uudella mitoitustavalla VC2(a) tehokkaan pystyjännityksen mitoitusarvo maanpinnan tasossa $\sigma'_{v1,d}$ ja perustamistasossa $\sigma'_{v2,d}$ lasketaan kuormitusyhtälöillä

$$8.12: \sigma'_{v1,d} = \gamma_Q \cdot \sigma'_{v1,Q,k}, \tag{4.124}$$

8.12:
$$\sigma'_{\nu_{2,d}} = 1,35 \cdot \sigma'_{\nu_{2,G,k}} + \gamma_Q \cdot \sigma'_{\nu_{2,Q,k}},$$
 (4.125)

ja mitoitustavalla VC2(b) kuormitusyhtälöillä

8.12:
$$\sigma'_{v1,d} = \gamma_Q \cdot \sigma'_{v1,Q,k},$$
 (4.126)

$$8.12: \sigma_{\nu_{2,d}}' = 1, 0 \cdot \sigma_{\nu_{2,G,k}}' + \gamma_Q \cdot \sigma_{\nu_{2,Q,k}}', \tag{4.127}$$

joissa $\gamma_Q = 1,35$ maantieliikennekuorman tapauksissa ja $\gamma_Q = 1,45$ rautatieliikennekuorman tapauksissa. Ominaiskuormat $\sigma'_{v1,G,k}$, $\sigma'_{v1,Q,k}$, $\sigma'_{v2,G,k}$ ja $\sigma'_{v2,Q,k}$ lasketaan kaavoilla (4.37) - (4.40).

<u>Vakauttavien kuormien vaikutuksien eli vakauttavan momentin mitoitusarvo *E*_{stb,d} lasketaan kaavalla</u>

$$E_{stb,d} = N_d \cdot (\frac{B}{2} + x_d), \tag{4.128}$$

jossa vaakaetäisyys x_d lasketaan kaavalla (4.80). N_d tarkastellaan edullisena kuormana ja lasketaan nykyisellä EQU-mitoitustavalla kuormitusyhtälöllä

6.10:
$$N_d = 0.9 \cdot W_k$$
 ja (4.129)

mitoitustavoilla VC2(a) ja VC2(b)kuormitusyhtälöillä

$$8.12: N_d = 1,0 \cdot W_k. \tag{4.130}$$

Liukumiskestävyyden murtorajatilaa varten laskettava vaakasuoraan perustuksen pohjaan kohdistuvan mitoituskuorma T_d on epäedullinen. Mitoitustavalla DA2* T_d laske-taan kaavaoilla (4.69) ja (4.70) ja mitoitustavoilla VC4 kaavoilla (4.76) ja (4.77).

4.6.3 Liukumiskestävyyden laskenta

<u>Liukumiskestävyys R_T lasketaan</u> avoimen tilan mitoitustavalla DA2* kaavalla (2.14) ja mitoitustavalla VC4+RFA kaavalla (2.35). Rakenteen ja kallion välinen kitkakulman ominaisarvo δ_k = 45° on Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeen (NCCI 7 2023, s. 44) mukainen ja ominaisarvo on yhtä kuin edustava arvo δ_{rep} .

Tehokkaan pystykuorman mitoitusarvo V'_d on aina edullinen. Mitoitustavalla DA2* V'_d lasketaan ominaisarvoilla kaavalla

$$V'_d = V'_k = N_k = W_k. (4.131)$$

Mitoitustavalla VC4 pysyvien edullisten pystykuormien edustava arvo $N_{G,rep,fav}$ lasketaan ominaisarvoilla kaavalla

$$N_{G,rep,fav} = N_k = W_k. \tag{4.132}$$

Nostetta *U* ei ole, joten nosteen edustava arvo on $U_{rep} = 0$.

5. VERTAILULASKELMIEN TULOKSET

Tässä luvussa esitetään luvun 4 laskentatapauksien tulokset. Laskentatapaukset on esitetty taulukossa 4.1. Laskentatapaukset mitoitettiin sekä nykyisten eurokoodien Suomessa käytettävillä mitoitustavoilla että kaikilla uusien eurokoodien mukaisilla mitoitustavoilla. Laskennat tehtiin eurokoodien mukaisilla analyyttisilla menetelmillä. Laskentatapaukset eivät välttämättä edusta mitään todellisia tilanteita eikä niitä tule käyttää todellisten tapausten mitoittamiseen.

Maanvaraiselle neliöanturalle (luku 4.2) ja jatkuvalle kulmatukimuurille (luku 4.3) mitoitettiin minimileveys *B* kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden murtorajatiloissa (GEO) eri pohjaolosuhteissa ja eri kuormilla sekä tarkistettiin eurokoodien epäkeskisyysehdot lukujen 2.3.2 ja 2.4.2 mukaisesti. Kallionvaraiselle neliöanturalle (luku 4.5) ja kulmatukimuurille (luku 4.6) mitoitettiin minimileveys *B* staattisen tasapainon (EQU) ja liukumiskestävyyden murtorajatiloissa eri kuormilla. Lävistysmurtumaa tutkittiin nosturin tukijalan laskentatapauksissa (luku 4.4) kantokestävyyden murtorajatilassa (GEO). Nosturin tukijalalle karkearakeisella täytöllä pehmeän saven päällä laskettiin täytölle minimipaksuus D_1 vakiokuormalla ja maksimipystykuorma Q_V vakiotäyttökerrospaksuudella.

Laskentatapauksissa ei otettu huomioon murtorajatiloja, jotka koskevat rakenteen tai rakenneosien sisäistä murtumista (STR), kokonaisvakavuutta, nosteen aiheuttamaa murtumista (UPL) tai hydraulista murtumista (HYD). Käyttörajatiloista (SLS) tarkistettiin vain kuormien epäkeskisyys.

Alaluvussa 5.1 esitetään maanvaraisen neliöanturan kuuden laskentatapauksen tulokset. Alaluvussa 5.2 esitetään maanvaraisen kulmatukimuurin 18 laskentatapauksen tulokset. Alaluvussa 5.3 esitetään nosturin tukijalan kuuden laskentatapauksen tulokset. Alaluvussa 5.4 esitetään kallionvaraisen neliöanturan yhden laskentatapauksen tulokset. Alaluvussa 5.5 esitetään kallionvaraisen kulmatukimuurin kolmen laskentatapauksen tulokset.

Tuloksissa on vertailtu pystydiagrammein rakenteiden leveyttä *B*, täyttökerroksen paksuutta D_1 tai maksimipystykuormaa $Q_{V,k}$ eri mitoitustapojen välillä jokaisella laskentatapauksella. Lisäksi on taulukoitu jokaisella laskentatapauksella jokaisen mitoitustavan tuottamat tärkeimmät tulosparametrit. Alalukujen 5.1, 5.2 ja 5.3 lopussa on esitetty yhteenveto ja tärkeimmät johtopäätökset alalukujen tuloksista sanallisesti, vertailu mitoitustavoista sisältäen muun muassa edullisimmat ja epäedullisimmat mitoitustavat jokaisessa laskentatapauksessa sekä vertailu eri mitoitustapojen keskimääräisestä suhteellisesta erosta Suomen nykyisin käytettävään murtorajatilojen mitoitustapaan DA2*.

5.1 Neliöantura maanvaraisesti (GEO)

Maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukset mitoitettiin taulukon 4.2 kahdeksalla mitoitustavalla eli Suomessa nykyisin käytettävillä mitoitustavoilla DA2 ja DA2* (ks. luku 2.3) sekä uusilla mitoitustapayhdistelmillä (a) VC1+M1, (b) VC3+M2, (c) VC1+M2, (d) VC1+RFA ja (e) VC1+RFA sekä yhdistelmällä VC4+RFA*, joka on yhdistelmä (e) VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40). Mitoitustapoja (a) ja (b) käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä. Mitoitus tehtiin kolmessa eri pohjaolosuhteessa, kuivassa tiiviissä moreenissa, kuivassa löyhässä hiekassa ja kuivassa mursketäytössä siltin päällä. Jokaisessa pohjaolosuhteessa mitoitus tehtiin kahdella eri vaakakuorman arvolla. Laskentatapauksia oli yhteensä kuusi. Taulukossa 5.1 on esitetty yhteenveto maanvaraisen neliöanturan laskentatapauksien osavarmuusluvuista eri mitoitustavoilla.

Nykyinen GEO EN 1990 2016)	(YM NA	Uusi GEO (EN 1990 2023, liite A.1.7)					
Osavarmuus- luku	DA2, DA2*	Osavarmuus- luku	(a) VC1 +M1	(b) VC3 +M2	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA
γ _{G,sup} (6.10a)	1,35	γ _G (8.14a)	1,35	1,0	1,35	1,35	-
<i>ξγ_{G,sup}</i> (6.10b)	1,15	ξγ _g (8.14b)	1,15	1,0	1,15	1,15	-
Y_{G,inf}	0,90	γ _{Gw} (8.14a)	1,20	1,0	1,0	1,0	-
		<i>ξγ_{Gw}</i> (8.14b)	1,02	1,0	1,02	1,02	-
		Y _{G,fav}	1,0	1,0	1,0	1,0	-
Yq	1,5	Yq	1,5	1,3	1,5	1,5	1,11
		γ ε	-	-	-	-	1,35
Υ φ'	1,0	Υ φ'	1,0	1,25	1,25	-	-
Ycu	1,0	Ycu	1,0	1,4	1,4	-	-
Y R,v	1,55	YRN	-	-	-	1,4	1,4
Y R,h	1,1	γ RT	-	-	-	1,1	1,1

Taulukko 5.1. Osavarmuusluvut maanvaraisen neliöanturan laskentatapauksille eri mitoitustavoilla.
Maanvaraisen neliöanturan leveys *B* minimoitiin iterointitarkkuudella 0,1 m niin, että toteutui

- kantokestävyysehto (2.31) " $N_d \leq R_{Nd}$ ",
- liukumiskestävyysehto (2.32) " $T_d \leq R_{Td}$ ",
- mitoitustavoilla DA2* ja VC4 epäkeskisyysehto (2.22) "e_{B,k}/B ≤ 1/3",
- mitoitustavoilla VC1 ja VC3 "e_{B,d}/B ≤ 1/3"- ehto eli epäkeskisyysehto (2.21) kuormien mitoitusarvoilla laskettuna, ja
- mitoitustavalla VC4+RFA lisäksi " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehto (2.40).

Se ehto, joka viimeisenä toteutuu iteroitaessa neliöanturan leveyttä B, katsotaan määrääväksi ehdoksi. Mitoitustavoista (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 epäedullisemman määräävä ehto on mitoitustapojen (*a*) ja (*b*) yhdistelmän määräävä ehto. Kantokestävyysehto (2.31) ja liukumiskestävyysehto (2.32) katsotaan tärkeämmäksi kuin epäkeskisyysehdot " $e_{B,d}B \le 1/3$ " ja (2.22). Tämä tarkoittaa sitä, että jos iteroitua anturaleveyttä B pienennettäessä 0,1 metrillä sekä kantokestävyysehto (2.31) että " $e_{B,d}B \le 1/3$ "- ehto tai (2.22) eivät enää toteutuisi, katsotaan kantokestävyysehto (2.31) määrääväksi ehdoksi. Liukumiskestävyysehdolla (2.32) toimitaan vastaavasti. Tämä valinta on tehty sen takia, että kanto- ja liukumiskestävyysehdoille on vahvemmat perusteet kuin epäkeskisyysehdoille, koska kantokestävyys perustuu koeteltuun teoriaan ja laskentaan (ks. luku 3) ja liukumiskestävyys yleisesti käytettyyn Mohr–Coulombin murtokriteeriin (ks. yhtälö 3.3). Ehto " $e_{B,d}B \le 1/3$ "- ehto perustuu "erityisten varotoimenpiteiden" välttämiseen (ks. luku 2.4.2). Epäkeskisyysehto (2.22) perustuu pienempään epäkeskisyyteen ominaisarvoilla laskemisen takia (ks. luku 2.3.2) sekä raon muodostumisen rajoittamiseen perustuksen alle (ks. luku 2.4.2, tarkemmin prEN 1997-3 2022, s. 78).

Kantokestävyysehdon (2.31) perusteella laskettiin kantokestävyyden ylimitoituskerroin

$$ODF_{KK} = R_{Nd}/N_d \ge 1. \tag{5.1}$$

Liukumiskestävyysehdon (2.32) perusteella laskettiin liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin

$$ODF_{LK} = R_{Td}/T_d \ge 1. \tag{5.2}$$

" $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehdon (2.40) perusteella laskettiin suhde $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$.

Koska anturaleveys *B* voi iterointitarkkuuden takia saada arvoja vain 0,1 m välein, mitoitustulos määräävälle ehdolle voi olla suhteellisen kaukanakin ehdon raja-arvosta. Esimerkiksi eräässä laskentatapauksessa eräällä mitoitustavalla kantokestävyyden ylimitoituskerroin oli jopa $ODF_{\kappa\kappa}$ = 1,21, vaikka kantokestävyysehto (2.31) oli määräävä ehto mitoituksessa. Tämä johtui siitä, että 0,1 m pienempi anturaleveys olisi laskenut kantokestävyyden ylimitoituskertoimen ODF_{KK} alle 1,0, mikä johtui taas siitä, että iterointitarkkuus (0,1 m) oli niin suuri ja avoimen tilan kantokestävyys niin epälineaarinen suhteessa anturaleveyteen *B*.

Tuloksissa on vertailtu pystydiagrammein leveyttä *B* eri mitoitustapojen välillä jokaisella laskentatapauksella. Lisäksi on taulukoitu jokaisella laskentatapauksella jokaisen mitoitustavan tuottamat tärkeimmät tulosparametrit: leveys *B*, leveyden *B* ja mitoitustavan DA2* leveyden B_{DA2*} suhde B/B_{DA2*} , kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{KK} , liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{LK} , suhteellinen epäkeskisyys mitoitusarvoilla $e_{B,d}/B$ ja ominaisarvoilla $e_{B,k}/B$, suhde T_{rep}/N_{rep} , määräävä kuormitusyhtälö (kuorm.yht.) ja määräävä kuormitustapaus (*Vmax / Vmin*).

Alaluvussa 5.1.1 esitetään maanvaraisen neliöanturan laskentatapauksien tulokset kuivassa tiiviissä moreenissa suurella ja pienellä vaakakuormalla. Alaluvussa 5.1.2 esitetään laskentatapauksien tulokset kuivassa löyhässä hiekassa. Alaluvussa 5.1.3 esitetään laskentatapauksien tulokset kuivassa mursketäytössä siltin päällä. Alaluvussa 5.1.4 esitetään yhteenveto maanvaraisen neliöanturan kuuden laskentatapauksen tuloksista sanallisesti. Lisäksi yhteenvedossa vertaillaan laskentatapauskohtaisesti mm. edullisinta ja epäedullisinta mitoitustapaa, leveyden *B* vaihteluväliä ja yleisintä määräävää mitoitusehtoa sekä verrataan mitoitustapojen suhteellista eroa mitoitustapaan DA2*, jota yleensä käytetään Suomessa anturaperustuksen GEO-murtorajatilojen mitoituksessa.

Liitteessä A esitetään maanvaraisen neliöanturan kuuden laskentatapauksen yksityiskohtaisemmat mitoitustulokset jokaisella mitoitustavalla ja molemmilla kuormitusyhtälöillä (6.10a ja 6.10b tai 8.14a ja 8.14b) *Vmax-* ja *Vmin*-kuormitustapauksissa. Mitoitustulokset sisältävät mitoitusleveyden *B*, neliöanturaan pystysuorasti ja vaakasuorasti kohdistuvien resultanttivoimien mitoitusarvot N_d ja T_d , kantokestävyyden ylimitoituskertoimen ODF_{KK} , liukumiskestävyyden ylimitoituskertoimen ODF_{LK} ja suhteellisen epäkeskisyyden mitoitusarvoilla $e_{B,d}/B$ ja ominaisarvoilla $e_{B,k}/B$. Lisäksi liite A sisältää mitoitustavoilla (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* kulmatukimuuriin pystysuorasti ja vaakasuorasti kohdistuvien resultanttivoimien edustavat arvot N_{rep} ja T_{rep} ja suhteen T_{rep}/N_{rep} .

5.1.1 Kuiva tiivis moreeni

Laskentatapaukset maanvaraiselle neliöanturalle kuivassa tiiviissä moreenissa suurella vaakakuormalla $Q_{H,k}$ = 150 kN etäisyydellä *h* = 4,0 m maanpinnasta ja pienellä vaakakuormalla $Q_{H,k}$ = 50 kN etäisyydellä *h* = 2,0 m maanpinnasta on esitetty luvussa 4.2.5 ja kuvassa 4.2. Maanvaraisten neliöanturoiden mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla esitetään pystydiagrammeina kuvassa 5.1. Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.



Kuva 5.1. Maanvaraisen neliöanturan mitoitusleveys B kuivassa tiiviissä moreenissa. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Taulukossa 5.2 on esitetty suuren vaakakuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.3 pienen vaakakuorman laskentatapauksen tärkeimmät tulosparametrit: leveys *B*, leveyden *B* ja mitoitustavan DA2* leveyden *B*_{DA2*} suhde *B*/*B*_{DA2*}, kantokestävyyden ylimitoituskerroin *ODF*_{KK}, liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin *ODF*_{LK}, suhteellinen epäkeskisyys mitoitusarvoilla $e_{B,d}/B$ ja ominaisarvoilla $e_{B,k}/B$, "*T*_{rep}/*N*_{rep} \leq 0,2"-ehdon (2.40) suhde *T*_{rep}/*N*_{rep}, määräävä kuormitusyhtälö (kuorm.yht.) ja määräävä kuormitustapaus (*Vmax / Vmin*). Taulukoissa on merkitty keltaisella määräävä parametri.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
			+M1 ¹	+M21	+M2	+RFA	+RFA	+RFA*
<i>B</i> [m]	2,8	2,2	3,0	2,7	3,0	3,0	2,3	2,3
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	127 %	100 %	136 %	123 %	136 %	136 %	105 %	105 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,21	1,37	4,06	1,52	1,79	2,90	1,20	1,20
<i>ODFLK</i> ≥ 1	3,55	3,64	4,46	3,95	3,57	4,06	4,98	4,98
e _{B,d} /B ≤ 1/3			0,32	0,32	0,32	0,32		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,32					0,31	0,31
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,13	0,13
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin

Taulukko 5.2. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukselle kuivassa tiiviissä moreenissa suurella vaakakuormalla.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "Trep/Nrep ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Suuren vaakakuorman laskentatapauksessa määräävä ehto oli kaikilla mitoitustavoilla " $e_{B,d}/B \le 1/3$ "- ehto tai epäkeskisyysehto (2.22) " $e_{B,k}/B \le 1/3$ " paitsi mitoitustavoilla DA2, (e) VC4+RFA ja VC4+RFA* kantokestävyysehto (2.31). Mitoitustavalla DA2 epäkeskisyysehtoja ei ole, mutta epäkeskisyyden epävarmuus otettiin huomioon kantokestävyyden laskennassa, koska epäkeskisyys lasketaan mitoitusarvoilla. Mitoitustavoilla (e) VC4+RFA ja VC4+RFA* mitoitustapaa DA2* 5 % suuremman anturaleveyden aiheutti pienempi kantokestävyys. Tämä johtui siitä, että mitoitustavoilla (e) VC4+RFA ja VC4+RFA* käytettiin muuttuville kuormille osavarmuuslukua $\gamma_{Q,red} = 1,11$ epäkeskisyyden e_B ja kuormakaltevuuskertoimien i_q ja i_γ laskennassa. Lisäksi mitoitustavalla DA2* käytetään epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerrointa ξ kuormitusyhtälöllä 6.10b toisin kuin mitoitustavoilla (e) VC4+RFA ja VC4+RFA* kuormitusyhtälöllä 8.14b.

Pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2* ja suurimman leveyden *B* tuottivat mitoitustapojen *(a)* VC1+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhdistelmä ja mitoitustavat *(c)* VC1+M2, *(d)* VC1+RFA. Kantokestävyyden ylimitoituskerroin $ODF_{\kappa\kappa}$ oli jopa 1,21, koska anturaleveyden iterointitarkkuuden (0,1 m) suhde anturaleveyksiin *B* = 2,2...2,8 m oli suuri ja avoimen tilan kantokestävyys oli niin epälineaarinen suhteessa anturaleveyteen *B*.

Mitoitustapojen *(a)* VC1+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhdistelmällä ja mitoitustavoilla *(c)* VC1+M2, *(d)* VC1+RFA ja DA2 anturan leveys *B* on 23–36 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2*. Tämä johtui siitä, että mitoitustavalla DA2* epäkeskisyys lasketaan ominaisarvoilla, kun taas mitoitustavoilla DA2, VC1 ja VC3 epäkeskisyys lasketaan mitoitusarvoilla.

Kuormitustapaus *Vmin* oli määräävä kaikilla mitoitustavoilla. Mitoitustavalla DA2 tämä johtui siitä, että *Vmin*-tapauksessa epäkeskisyys e_B ja kuorman vinous *T/N* olivat suurempia kuin *Vmax*-tapauksessa ja siten kantokestävyys oli pienempi. Muilla mitoitustavoilla syy oli se, että epäkeskisyysehdot " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " ja " $e_{B,k}/B \le 1/3$ tarkistetaan *Vmin*-

tapauksessa, jossa epäkeskisyys on aina suurempi kuin *Vmax*-tapauksessa. Määräävä kuormitusyhtälö oli aina 6.10b tai 8.14b eikä 6.10a tai 8.14a, koska jälkimmäiset eivät sisältäneet muuttuvia vaakakuormia.

Paramotri		ΠΔ2*	(a) VC1	(h) VC3	(c) VC1	(d) VC1		VC4
rarametri	DAL	DAL	+M1 ¹	+M2 ¹	+M2	+RFA	(€) VO 4 +RF∆	+RFΔ*
P [m]	1 2	1.0	1 1	1 /	1.5	10	1.2	10
D [III]	1,3	1,2	1,1	1,4	1,5	1,2	۲,۲	٦,٢
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	108 %	100 %	92 %	117 %	125 %	100 %	100 %	100 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,21	1,09	1,19	1,14	1,18	1,08	1,02	1,02
<i>ODF_{LK}</i> ≥ 1	8,99	9,91	10,83	10,22	8,94	9,91	13,39	13,39
e _{B,d} /B ≤ 1/3			0,23	0,15	0,16	0,21		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,14					0,14	0,14
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,05	0,05
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax

Taulukko 5.3. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukselle kuivassa tiiviissä moreenissa pienellä vaakakuormalla.

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Pienen vaakakuorman laskentatapauksessa määräävä ehto kaikilla mitoitustavoilla oli kantokestävyysehto (2.31). Pienimmän leveyden *B* tuottivat mitoitustavat DA2*, (*d*) VC1+RFA, (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* ja suurimman leveyden *B* tuotti mitoitustapa (*c*) VC1+M2. Anturan leveys *B* oli mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 25 % suurempi ja mitoitustapojen (*a*) ja (*b*) yhdistelmällä 17 % suurempi kuin mitoitustavoilla DA2*, (*d*) VC1+RFA, (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA*. Maan lujuuteen varmuuden kohdistavilla mitoitustavoilla (M2) leveys *B* oli siis selvästi suurempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdistetaan kestävyyteen (RFA, DA2, DA2*) tai ei kumpaakaan (M1). Pienen vaakakuorman takia ei ollut juurikaan merkitystä kohdistettiinko varmuus kuorman vaikutuksiin (DA2*, VC4) vai kuormiin (DA2, VC1, VC3).

Kuormitustapaus *Vmax* oli määräävä kaikilla mitoitustavoilla, koska pienen vaakakuorman takia epäkeskisyyden e_B maksimointi vaikutti (*Vmin*) kantokestävyyteen vähemmän kuin pystykuormien maksimointi (*Vmax*). Toisaalta vaakakuormat pienensivät kantokestävyyttä niin paljon, että määräävä kuormitusyhtälö oli aina 6.10b tai 8.14b eikä 6.10a tai 8.14a, jotka eivät sisältäneet muuttuvia vaakakuormia.

Kummassakaan laskentatapauksessa liukumiskestävyysehto (2.32) tai " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "ehto (2.40) ei ollut koskaan määräävä, koska vaakakuormien etäisyys *h* maanpinnasta oli niin suuri, että kantokestävyysehdon (2.31) tai epäkeskisyysehtojen " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " tai " $e_{B,k}/B \le 1/3$ " (2.22) raja-arvot saavutettiin anturaleveyttä *B* iteroitaessa ennen liukumiskestävyysehdon (2.32) tai " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehdon (2.40) raja-arvoja.

5.1.2 Kuiva löyhä hiekka

Laskentatapaukset maanvaraiselle neliöanturalle kuivassa löyhässä hiekassa suurella vaakakuormalla $Q_{H,k}$ = 150 kN etäisyydellä h = 4,0 m maanpinnasta ja pienellä vaakakuormalla $Q_{H,k}$ = 50 kN etäisyydellä h = 2,0 m maanpinnasta on esitetty luvussa 4.2.5 ja kuvassa 4.3. Maanvaraisten neliöanturoiden mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla esitetään pystydiagrammeina kuvassa 5.2. Mitoitustapoja (*a*) ja (*b*) käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.



Kuva 5.2. Maanvaraisen neliöanturan mitoitusleveys B kuivassa löyhässä hiekassa. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Taulukossa 5.4 on esitetty suuren vaakakuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.5 pienen vaakakuorman laskentatapauksen tärkeimmät tulosparametrit. Taulukoissa on merkitty keltaisella määräävä parametri.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
			+M1'	+M2'	+M2	+RFA	+RFA	+RFA*
<i>B</i> [m]	3,2	2,6	3,0	3,0	3,2	3,0	2,8	2,8
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	123 %	100 %	115 %	115 %	123 %	115 %	108 %	108 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,08	1,07	1,44	1,04	1,02	1,03	1,12	1,12
<i>ODFLK</i> ≥ 1	2,94	3,02	3,50	3,23	2,88	3,18	4,18	4,18
e _{B,d} /B ≤ 1/3			0,33	0,28	0,30	0,33		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,27					0,24	0,24
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,12	0,12
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin

Taulukko 5.4. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukselle kuivassa löyhässä hiekassa suurella vaakakuormalla.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "*T_{rep}/N_{rep}* ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoituskseen kyseisellä mitoitustavalla.

Suuren vaakakuorman laskentatapauksessa määräävä ehtö oli kantokestävyysehtö (2.31) kaikilla mitoitustavoilla paitsi tavalla (*a*) VC1+M1, jolla määräävä ehtö oli " $e_{B,d}/B \le 1/3$ "-ehtö. Myös mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA epäkeskisyys $e_{B,d}/B$ oli lähellä epäkeskisyysehtön " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " raja-arvoa, mutta koska kantokestävyysehtö (2.31) ei olisi myöskään toteutunut 0,1 m pienemmällä anturaleveydellä, katsottiin kantokestävyysehtö (2.31) määrääväksi ehdöksi (perustelut luvun 5.1 kolmannessa kappaleessa).

Pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2* ja suurimman leveyden *B* tuottivat mitoitustavat DA2 ja (*c*) VC1+M2. Anturan leveys *B* oli mitoitustavoilla DA2 ja (*c*) VC1+M2 23 % suurempi ja mitoitustapojen (*a*) ja (*b*) yhdistelmällä ja mitoitustavalla (*d*) 15 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2*. Mitoitustavoilla (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* mitoitustapaa DA2* 8 % suuremman anturaleveyden aiheutti pienempi kantokestävyys. Tämä johtui samoista syistä kuin kuivan tiiviin moreenin suuren vaakakuorman tapauksessa (ks. luku 5.1.1).

Mitoitustavat, joissa varmuus kohdistettiin kuorman vaikutuksiin, tuottivat siis kaikki taloudellisemman anturan kuin mitoitustavat, joissa varmuus kohdistettiin kuormiin. Tämä johtui siitä, että epäkeskisyyden laskeminen mitoitusarvoilla johtaa pienempään kantokestävyyteen kuin laskeminen ominaisarvoilla. Lisäksi varmuuden kohdistaminen maan lujuuteen kestävyyden sijaan teki mitoitustavasta (*c*) VC1+M2 epätaloudellisimman mitoitustavan.

Kuormitustapaus *Vmin* oli määräävä kaikilla mitoitustavoilla. Tämä johtui siitä, että *Vmin*tapauksessa epäkeskisyys e_B ja kuorman vinous *T/N* olivat suurempia kuin *Vmax*-tapauksessa, ja siten kantokestävyys oli pienempi. Määräävä kuormitusyhtälö oli aina 6.10b tai 8.14b eikä 6.10a tai 8.14a, koska jälkimmäiset eivät sisältäneet muuttuvia vaakakuormia.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
			+M1 ¹	+M21	+M2	+RFA	+RFA	+RFA*
<i>B</i> [m]	1,8	1,8	1,6	1,9	2,1	1,8	1,8	1,8
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	100 %	100 %	89 %	106 %	117 %	100 %	100 %	100 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,01	1,09	1,17	1,02	1,12	1,12	1,03	1,03
<i>ODFLK</i> ≥ 1	7,46	8,29	8,96	8,50	7,52	8,29	11,19	11,19
e _{B,d} /B ≤ 1/3			0,15	0,11	0,11	0,13		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,09					0,09	0,09
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,05	0,05
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax

Taulukko 5.5. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukselle kuivassa löyhässä hiekassa pienellä vaakakuormalla.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "Trep/Nrep ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Pienen vaakakuorman laskentatapauksessa määräävä ehto kaikilla mitoitustavoilla oli kantokestävyysehto (2.31). Pienimmän leveyden *B* tuottivat mitoitustavat DA2, DA2*, (*d*) VC1+RFA, (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA*. Suurimman leveyden *B* tuotti mitoitustapa (*c*) VC1+M2. Maan lujuuteen varmuuden kohdistavilla mitoitustavoilla (M2) leveys *B* oli suurempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdistetaan kestävyyteen (RFA, DA2, DA2*) tai ei kumpaakaan (M1). Anturan leveys *B* oli mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 17 % suurempi ja mitoitustapojen (*a*) ja (*b*) yhdistelmällä 6 % suurempi kuin mitoitustavoilla DA2, DA2*, (*d*) VC1+RFA, (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA*.

Kuormitustapaus *Vmax* ja kuormitusyhtälöt 6.10b ja 8.14b olivat määrääviä kaikilla mitoitustavoilla samoista syistä kuin kuivan tiiviin moreenin pienen vaakakuorman laskentatapauksessa (ks. luku 5.1.1). Pienen vaakakuorman takia ei ollut juurikaan merkitystä kohdistettiinko varmuus kuorman vaikutuksiin (DA2*, VC4) vai kuormiin (DA2, VC1, VC3).

Kummassakaan laskentatapauksessa liukumiskestävyysehto (2.32) tai " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "ehto (2.40) ei ollut koskaan määräävä, koska vaakakuormien etäisyys *h* maanpinnasta oli niin suuri, että kantokestävyysehdon (2.31) tai epäkeskisyysehtojen " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " tai " $e_{B,k}/B \le 1/3$ " (2.22) raja-arvot saavutettiin anturaleveyttä *B* iteroitaessa ennen liukumiskestävyysehdon (2.32) tai " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehdon (2.40) raja-arvoja.

5.1.3 Kuiva mursketäyttö siltin päällä

Laskentatapaukset maanvaraiselle neliöanturalle kuivassa mursketäytössä siltin päällä suurella vaakakuormalla $Q_{H,k}$ = 150 kN etäisyydellä *h* = 4,0 m maanpinnasta ja pienellä vaakakuormalla $Q_{H,k}$ = 50 kN etäisyydellä *h* = 2,0 m maanpinnasta on esitetty luvussa

4.2.5 ja kuvassa 4.4. Maanvaraisten neliöanturoiden mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla on esitetty pystydiagrammeina kuvassa 5.3. Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.



Kuva 5.3. Maanvaraisen neliöanturan mitoitusleveys B kuivassa mursketäytössä siltin päällä. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Taulukossa 5.6 on esitetty suuren vaakakuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.7 pienen vaakakuorman laskentatapauksen tärkeimmät tulosparametrit. Taulukoissa on merkitty keltaisella määräävä parametri.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
			+M11	+M21	+M2	+RFA	+RFA	+RFA*
<i>B</i> [m]	4,7	4,5	4,0	4,2	4,5	4,5	4,6	4,6
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	104 %	100 %	89 %	93 %	100 %	100 %	102 %	102 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,02	1,04	1,07	1,01	1,02	1,02	1,01	1,01
<i>ODF_{LK}</i> ≥ 1	4,82	5,18	5,23	4,99	4,55	5,18	7,11	7,11
e _{B,d} /B ≤ 1/3			0,21	0,16	0,17	0,17		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,11					0,11	0,11
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,09	0,09
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax
A								

 Taulukko 5.6. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukselle kuivassa mursketäytössä siltin päällä suurella vaakakuormalla.

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa. Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Suuren vaakakuorman laskentatapauksessa määräävä ehto oli kantokestävyysehto (2.31) kaikilla mitoitustavoilla. Pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapojen (*a*) ja (*b*) yh-

distelmä ja suurimman leveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2. Anturan leveys *B* oli mitoitustavalla DA2 4 % suurempi ja mitoitustapojen *(a)* ja *(b)* yhdistelmällä 7 % pienempi kuin mitoitustavoilla DA2*, *(c)* VC1+M2 ja *(d)* VC1+RFA. Mitoitustavoilla *(e)* VC4+RFA ja VC4+RFA* mitoitustapaa DA2* 2 % suuremman anturaleveyden aiheutti pienempi kantokestävyys. Tämä johtui samoista syistä kuin kuivan tiiviin moreenin suuren vaakakuorman tapauksessa (ks. luku 5.1.1).

Kuormitustapaus *Vmax* oli määräävä kaikilla mitoitustavoilla, koska vaakakuorma oli niin pieni suhteessa anturaleveyteen *B*, että epäkeskisyyden e_B maksimointi vaikutti (*Vmin*) kantokestävyyteen vähemmän kuin pystykuormien maksimointi (*Vmax*). Toisaalta vaakakuormat pienensivät kantokestävyyttä niin paljon, että määräävä kuormitusyhtälö oli aina 6.10b tai 8.14b eikä 6.10a tai 8.14a, jotka eivät sisältäneet muuttuvia vaakakuormia.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	VC4 +RFA*
<i>B</i> [m]	3,9	3,8	3,1	3,3	3,6	3,7	3,9	3,9
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	103 %	100 %	82 %	87 %	95 %	97 %	103 %	103 %
<i>ОDF_{КК}</i> ≥ 1	1,03	1,02	1,06	1,02	1,03	1,05	1,02	1,02
<i>ODFLK</i> ≥ 1	12,62	13,79	13,59	12,93	11,75	13,57	18,93	18,93
e _{B,d} /B ≤ 1/3			0,06	0,05	0,05	0,05		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,03					0,03	0,03
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,03	0,03
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax	Vmax

Taulukko 5.7. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen neliöanturan laskentatapaukselle kuivassa mursketäytössä siltin päällä pienellä vaakakuormalla.

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "Trep/Nrep ≤ 0,2"-ehtoa.

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Pienen vaakakuorman laskentatapauksessa määräävä ehtö kaikilla mitoitustavoilla oli kantokestävyysehtö (2.31). Pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapojen (*a*) ja (*b*) yhdistelmä ja suurimman leveyden *B* tuottivat mitoitustavat DA2 ja (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA*. Anturan leveys *B* oli mitoitustavoilla DA2, (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* 3 % suurempi, mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA 3 % pienempi, (*c*) VC1+M2 5 % pienempi ja mitoitustapojen (*a*) ja (*b*) yhdistelmällä 13 % pienempi kuin mitoitustavalla DA2*. Kuormitustapaus *Vmax* ja kuormitusyhtälöt 6.10b ja 8.14b olivat määrääviä kaikilla mitoitustavalla samoista syistä kuin kuivan tiiviin moreenin pienen vaakakuorman laskentatapauksessa (ks. luku 5.1.1).

Molemmissa laskentatapauksissa pienimmät anturaleveydet tuottivat mitoitustapojen *(a)* ja *(b)* yhdistelmä ja mitoitustapa *(c)*, jotka karkearakeisilla moreenilla ja hiekalla (ks. 5.1.1 ja 5.1.2) tuottivat päinvastoin suurimpia anturaleveyksiä. Tämä johtuu siitä, että suljetun

tilan kantokestävyyskaava (3.43) on lähes lineaarinen maan lujuuden suhteen toisin kuin avoimen tilan kaava (3.39). Tämä aiheuttaa sen, että mitoitustavat, joilla osavarmuusluvut kohdistetaan kestävyyteen (DA2, DA2* ja RFA), eivät saa sitä etua suljetun tilan kantokestävyysmitoituksessa verrattuna mitoitustapoihin, joilla osavarmuusluvut kohdistetaan lujuuteen (M2) kuten avoimen tilan kantokestävyysmitoituksessa.

Molemmissa tapauksissa mitoitustapa (e) VC4+RFA tuotti suuremman anturan kuin mitoitustapa (d) VC1+RFA, koska vaakakuorma oli niin pieni suhteessa anturaleveyteen *B*, että epäkeskisyyden laskeminen kuormien mitoitusarvoilla ominaisarvojen sijaan vaikutti vähemmän kantokestävyyteen kuin karkearakeisissa tapauksissa. Lisäksi määräävä kuormitusyhtälö oli 8.14b molemmilla mitoitustavoilla ja kuormien vaikutusten laskenta lineaarinen, joten varsinkin pienen vaakakuorman (muuttuva) tapauksessa mitoitustapa (d) VC1+RFA sai etua pienemmän pysyvän kuorman osavarmuusluvun $\xi\gamma_G$ = 1,15 takia verrattuna mitoitustapaan (e) VC4+RFA, jonka kuormien vaikutusten osavarmuusluku on γ_E = 1,35. Tätä jälkimmäistä eroa ei mitoitustavoilla DA2 ja DA2* ole, joten DA2 tuotti suuremman anturaleveyden *B* molemmissa tapauksissa.

Kummassakaan laskentatapauksessa liukumiskestävyysehto (2.32) tai " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "ehto (2.40) ei ollut koskaan määräävä, koska vaakakuormien etäisyys *h* maanpinnasta oli niin suuri, että kantokestävyysehdon (2.31) tai epäkeskisyysehtojen " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " tai " $e_{B,k}/B \le 1/3$ " (2.22) raja-arvot saavutettiin anturaleveyttä *B* iteroitaessa ennen liukumiskestävyysehdon (2.32) tai " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehdon (2.40) raja-arvoja.

5.1.4 Yhteenveto maanvaraisen neliöanturan tuloksista

Maanvaraisen neliöanturan karkearakeisissa laskentatapauksissa taloudellisimman eli pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2* ja lisäksi pienillä vaakakuormilla *(d)* VC1+RFA, *(e)* VC4+RFA ja VC4+RFA*. Koska " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehto (2.40) ei ollut koskaan määräävä, tuottivat mitoitustavat *(e)* VC4+RFA ja VC4+RFA* luonnollisesti täysin samat tulokset. Hienorakeisissa laskentatapauksissa pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapojen *(a)* VC1+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhdistelmä. Tämä johtuu siitä, että suljetun tilan kantokestävyyskaava (3.43) on lähes lineaarinen maan lujuuden suhteen toisin kuin avoimen tilan kaava (3.39). Tämä aiheuttaa sen, että mitoitustavat, joilla osavarmuusluvut kohdistetaan kestävyyteen (DA2, DA2* ja RFA), eivät saa sitä etua suljetun tilan kantokestävyysmitoituksessa verrattuna mitoitustapoihin, joilla osavarmuusluvut kohdistetaan lujuuteen (M2) kuten avoimen tilan kantokestävyysmitoituksessa. Mitoitustapojen *(a)* VC1+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhdistelmästä mitoitustapa *(a)* VC1+M1 oli epäedullisempi vain yhdessä laskentatapauksessa kuudesta maanvaraisella neliöanturalla. Tässä kuivan tiiviin moreenin ja suuren vaakakuorman laskentatapauksessa molemmilla mitoitustavoilla määrääväksi ehdoksi tuli epäkeskisyysehto " $e_{B,d}/B \le 1/3$ "- ehto. Mitoitustavalla (*a*) VC1+M1 epäkeskisyys laskettuna mitoituskuormill*a* $e_{B,d}$ on suurempi kuin mitoitustavalla (*b*) VC3+M2 suurempien kuormaosavarmuuslukujen takia.

Yleensä epätaloudellisimman eli suurimman leveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2 tai (*c*) VC1+M2. Laskentatapauksen suurimman leveyden *B* suhteellinen ero pienimpään leveyteen *B* mitoitustapojen välillä eli *B*:n vaihteluväli-% sai arvoja eri laskentatapauksissa välillä 12–36 %.

Karkearakeisissa laskentatapauksissa (*e*) VC4+RFA oli suurella vaakakuormalla edullisempi kuin (*d*) VC1+RFA, koska mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA epäkeskisyys lasketaan ominaisarvoilla, kun taas mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA epäkeskisyys lasketaan mitoitusarvoilla, mikä vaikutti merkittävästi kantokestävyyteen. Pienellä vaakakuormalla eroa ei ollut karkearakeisissa laskentatapauksissa. Hienorakeisissa laskentatapauksissa mitoitustapa (*e*) VC4+RFA oli epäedullisempi tai yhtä edullinen kuin mitoitustapa (*d*) VC1+RFA, koska vaakakuorma oli niin pieni suhteessa anturaleveyteen *B*, että epäkeskisyyden laskeminen mitoitusarvoilla ominaisarvojen sijaan vaikutti vähemmän kantokestävyyteen kuin karkearakeisissa tapauksissa. Lisäksi määräävä kuormitusyhtälö oli 8.14b molemmilla mitoitustavoilla ja kuormien vaikutusten laskenta lineaarinen, joten varsinkin pienen vaakakuorman (muuttuva) tapauksessa mitoitustapa (*d*) VC1+RFA sai etua pienemmän pysyvän kuorman osavarmuusluvun $\xi \gamma_G = 1,15$ takia verrattuna mitoitustapaan (*e*) VC4+RFA, jonka kuormien vaikutusten osavarmuusluku on $\gamma_E = 1,35$.

Määräävä ehto oli yhtä laskentatapausta lukuun ottamatta selkeästi kantokestävyys. Liukumiskestävyysehto (2.32) tai " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehto (2.40) ei ollut koskaan määräävä, koska vaakakuormien etäisyys *h* maanpinnasta oli niin suuri, että kantokestävyysehdon (2.31) tai epäkeskisyysehtojen " $e_{B,d}/B \leq 1/3$ " tai " $e_{B,k}/B \leq 1/3$ " (2.22) raja-arvot saavutettiin anturaleveyttä *B* iteroitaessa ennen liukumiskestävyysehdon (2.32) tai " $T_{rep}/N_{rep} \leq$ 0,2"-ehdon (2.40) raja-arvoja. Määräävä kuormitusyhtälö oli aina 6.10b tai 8.14b, koska kuormitusyhtälöt 6.10a ja 8.14a eivät sisältäneet vaakakuormia, jotka pienensivät merkittävästi kantokestävyyttä. *Vmax*-tapaus oli useammin määräävä kuin *Vmin*-tapaus.

(2.10).											
	Tiivis moree	ni	Löyhä hiel	ka	Mursketäyt päällä	tö siltin					
	Suuri vaa- kakuorma	Pieni vaa- kakuorma	Suuri vaaka- kuorma	Pieni vaaka- kuorma	Suuri vaaka- kuorma	Pieni vaa- kakuorma					
Edullisimmat mitoitustavat ¹	DA2*	DA2*, VC1+RFA, VC4+RFA, VC4+RFA*	DA2*	DA2, DA2*, VC1+RFA, VC4+RFA, VC4+RFA*	VC1+M1, VC3+M2	VC1+M1, VC3+M2					
Epäedullisim- mat mitoitus- tavat ²	VC1+M1, VC3+M2, VC1+M2, VC1+RFA	VC1+M2	DA2, VC1+M2	VC1+M2	DA2	DA2, VC4+RFA, VC4+RFA*					
<i>B</i> :n vaihtelu- väli-% ³	36 %	25 %	23 %	17 %	12 %	18 %					
Yleisin mää- räävä ehto (kpl)⁴	epäkeski- syys (5)	kantokestä- vyys (8)	kantokes- tävyys (7)	kantokestä- vyys (8)	kantokes- tävyys (8)	kantokestä- vyys (8)					
Määräävä k.yht. (kpl)⁵	a: 0, b: 8	a: 0, b: 8	a: 0, b: 8	a: 0, b: 8	a: 0, b: 8	a: 0, b: 8					
Vmax/Vmin ⁶	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 8, Vmin: 0	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 8, Vmin: 0	Vmax: 8, Vmin: 0	Vmax: 8, Vmin: 0					

Taulukko 5.8. Mitoitustapojen vertailutaulukko maanvaraisen neliöanturan laskentatapauksista. VC4+RFA* viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa $(2 \ 40)$

Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen pienin leveys B. Mitoitustavat (a) VC1+M1 ja (b) VC3+M2 tarkastellaan yhdessä.

Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen suurin leveys B. Mitoitustavat (a) ja (b) tarkastellaan yhdessä.

³ Laskentatapauksen suurimman leveyden suhteellinen ero pienimpään leveyteen mitoitustapojen välillä.

⁴ Laskentatapauksen yleisin määräävä ehto (kantokestävyys, liukumiskestävyys tai epäkeskisyys) mitoitustavoilla ja tämän määrä.

⁵ Laskentatapauksen määrät siitä, kuinka monella mitoitustavalla a eli 6.10a tai 8.14a on määräävä kuormitusyhtälö ja kuinka monella b eli 6.10b tai 8.14b. ⁶ Laskentatapauksen määrät siitä, kuinka monella mitoitustavalla *Vmax*-tapaus on määräävä ja kuinka monella *Vmin*-

tapaus

Nykyisin Suomessa käytetään usein mitoitustapaa DA2* anturaperustuksen GEO-murtorajatilojen mitoituksessa. Vertailua varten on laskettu jokaisen (n = 6) laskentatapauksen *i* jokaiselle mitoitustavalle *j* leveyden $B_{i,j}$ ja mitoitustavan DA2* leveyden $B_{i,DA2*}$ avulla keskimääräinen suhteellinen ero \bar{v}_j mitoitustapaan DA2* kaavalla

$$\bar{v}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_{i,j} - B_{i,DA2^*}}{B_{i,DA2^*}}.$$
(5.3)

Kuvassa 5.4 on esitetty maanvaraisen neliöanturan laskentatapauksien leveyden B keskimääräinen suhteellinen ero ⊽ eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2*. Huomataan, että tämän työn laskentatapauksissa mitoitustapa (c) VC1+M2 tuotti keskimäärin 16 %, mitoitustapa DA2 11 %, mitoitustapa (d) VC1+RFA 8 %, mitoitustapa (b) VC3+M2 7 %, (e) VC4+RFA ja VC4+RFA* 3 % suuremman leveyden B neliöanturalle kuin mitoitustapa DA2*. Mitoitustapa *(a)* VC1+M1, tuotti keskimäärin saman leveyden *B* neliöanturalle kuin mitoitustapa DA2* tämän työn laskentatapauksissa.



Kuva 5.4. Anturaleveyden B kaikkien laskentatapauksien keskimääräinen suhteellinen ero v eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2*. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Mitoitustavoilla DA2, (a) VC1+M1, (b) VC3+M2, (c) VC1+M2 ja (d) VC1+RFA epäkeskisyyden e_B ja kuorman vinouden *T/N* laskeminen mitoitusarvoilla lisäsi keskimääräistä anturaleveyttä varsinkin suuren vaakakuorman tapauksissa, koska epäkeskisyys e_B ja kuorman vinous *T/N* vaikuttavat kantokestävyyteen sekä epäkeskisyysehtoon " $e_{B,d}/B \le$ 1/3". Toisaalta mitoitustavalla (a) VC1+M1 keskimääräistä anturaleveyttä laski se, että lujuuden ja kestävyyden osavarmuusluvut olivat arvoltaan 1,0. Mitoitustavoilla (b) VC3+M2 ja (c) VC1+M2 keskimääräistä anturaleveyttä lisäsi osavarmuuslukujen kohdistaminen maan lujuuteen kestävyyden sijaan, koska avoimen tilan (karkearakeiset tapaukset) kantokestävyys on epälineaarinen maan lujuuden suhteen. Mitoitustavan (b) VC3+M2 pienemmät kuormaosavarmuusluvut ($\gamma_G = 1,0$ ja $\gamma_Q = 1,3$) verrattuna mitoitustapaan (c) VC1+M2 ($\gamma_G = 1,35$ ja $\gamma_Q = 1,5$) selittävät keskimäärin pienemmän anturaleveyden.

Mitoitustavan DA2 suurempi kestävyyden osavarmuusluku (γ_{RN} = 1,55) verrattuna mitoitustapaan (*d*) VC1+RFA (γ_{RN} = 1,4) selittää keskimäärin suuremman anturaleveyden. Mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA mitoitustapaa DA2* keskimäärin 3 % suuremman anturaleveyden aiheutti pienempi kantokestävyyden mitoitusarvo, vaikka kantokestävyyden osavarmuusluku oli pienempi (γ_{RN} = 1,4 vs. γ_{RN} = 1,55). Tämä johtui siitä, että mitoitustavoilla (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* käytettiin muuttuville kuormille osavarmuuslukua $\gamma_{Q,red}$ = 1,11 epäkeskisyyden *e*_B ja kuormakaltevuuskertoimien *i*_q, *i*_Y ja *i*_{cu} laskennassa. Lisäksi mitoitustavalla DA2* käytetään epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerrointa *ξ* kuormitusyhtälöllä 6.10b toisin kuin mitoitustavoilla *(e)* VC4+RFA ja VC4+RFA* kuormitusyhtälöllä 8.14b.

5.2 Kulmatukimuuri maanvaraisesti (GEO)

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset mitoitettiin taulukon 4.3 kahdeksalla mitoitustavalla eli Suomessa nykyisin käytettävillä mitoitustavoilla DA2 ja DA2* (ks. luku 2.3) sekä uusilla mitoitustapayhdistelmillä *(a)* VC4+M1, *(b)* VC3+M2, *(c)* VC1+M2, *(d)* VC1+RFA ja *(e)* VC1+RFA sekä yhdistelmällä VC4+RFA*, joka on yhdistelmä *(e)* VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40). Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä. Mitoitus tehtiin kuudessa eri pohjaolosuhteessa, kuivassa ja vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa, kuivassa ja vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa, kuivassa ja vedellä kyllästyneessä ja vedellä kyllästyneessä nursketaustatäytössä siltin päällä. Jokaisessa pohjaolosuhteessa mitoitus tehtiin kolmella eri liikennekuormalla, rautatieliikennekuormalla, maantieliikennekuormalla ja ilman liikennekuormaa, joka sijaitsee tuettavan maan päällä. Laskentatapauksia oli yhteensä 18. Taulukossa 5.9 on esitetty yhteenveto maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien osavarmuusluvuista eri mitoitustavoilla.

Nykyinen GEO (L 1990 2015)	VM NA EN	Uusi GEO (EN 1990 2023, liite A.2.8)							
Osavarmuus- luku	DA2, DA2*	Osavarmuusluku	(a) VC4 +M1	(b) VC3 +M2	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA		
γ _{G,sup} (6.10a)	1,35	γ _G (8.14a)	-	1,0	1,35	1,35	-		
<i>ξγ_{G,sup}</i> (6.10b)	1,25	<i>ξ</i> γ _G (8.14b)	-	1,0	1,15	1,15	-		
Y _{G,inf}	0,9	γ _{Gw} (8.14a)	-	1,0	1,20	1,20	-		
		<i>ξγ_{Gw}</i> (8.14b)	-	1,0	1,02	1,02	-		
		Y _{G,fav}	-	1,0	1,0	1,0	-		
γ _Q (tie)	1,35	γ _Q (tie)	1,0	1,15	1,35	1,35	1,0		
γ_Q (raide)	1,45	γ _Q (raide)	1,07	1,25	1,45	1,45	1,07		
		γε	1,35	-	-	-	1,35		
Υ φ'	1,0	Υ φ'	1,0	1,25	1,25	-	-		
Ycu	1,0	Ycu	1,0	1,4	1,4	-	-		
Υ R,v	1,55	YRN	-	-	-	1,4	1,4		
Y R,h	1,1	Ϋ́RT	-	-	-	1,1	1,1		

Taulukko 5.9. Osavarmuusluvut maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksille eri mitoitustavoilla.

Maanvaraisen kulmatukimuurin leveys *B* minimoitiin iterointitarkkuudella 0,1 m niin, että toteutui

- kantokestävyysehto (2.31) " $N_d \leq R_{Nd}$ ",
- liukumiskestävyysehto (2.32) " $T_d \leq R_{Td}$ ",
- mitoitustavoilla DA2* ja VC4 epäkeskisyysehdot (2.22) "e_{B,k}/B ≤ 1/3" ja (2.23)
 "e_{B,G,k}/B ≤ 1/6",
- mitoitustavoilla VC1 ja VC3 "e_{B,d}/B ≤ 1/3"- ehto eli epäkeskisyysehto (2.21) kuormien mitoitusarvoilla laskettuna ja epäkeskisyysehto (2.23) "e_{B,G,k}/B ≤ 1/6",
- mitoitustavalla VC4+RFA lisäksi " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehto (2.40).

Se ehto, joka viimeisenä toteutuu iteroitaessa neliöanturan leveyttä B, katsotaan määrääväksi ehdoksi. Mitoitustavoista (a) VC4+M1 ja (b) VC3+M2 epäedullisemman määräävä ehto on mitoitustapojen (a) ja (b) yhdistelmän määräävä ehto. Kantokestävyysehto (2.31) ja liukumiskestävyysehto (2.32) katsotaan tärkeämmäksi kuin epäkeskisyysehdot $"e_{B,d}/B \le 1/3"$, (2.22) ja (2.23). Tämä tarkoittaa sitä, että jos iteroitua anturaleveyttä B pienennettäessä 0,1 metrillä sekä kantokestävyysehto (2.31) että epäkeskisyysehto $"e_{B,d}$ /B ≤ 1/3", (2.22) tai (2.23) eivät enää toteutuisi, katsotaan kantokestävyysehto (2.31) määrääväksi ehdoksi. Liukumiskestävyysehdolla (2.32) toimitaan vastaavasti. Tämä valinta on tehty sen takia, että kanto- ja liukumiskestävyysehdoille on vahvemmat perusteet kuin epäkeskisyysehdoille, koska kantokestävyys perustuu koeteltuun teoriaan ja laskentaan (ks. luku 3) ja liukumiskestävyys yleisesti käytettyyn Mohr–Coulombin murtokriteeriin (ks. yhtälö 3.3). Epäkeskisyysehto " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " perustuu "erityisten varotoimenpiteiden" välttämiseen (ks. luku 2.4.2). Epäkeskisyysehdot (2.22) ja (2.23) perustuvat epäkeskisyyden laskemiseen ominaisarvoilla (ks. luku 2.3.2) sekä raon muodostumisen rajoittamiseen perustuksen alle (ks. luku 2.4.2, tarkemmin prEN 1997-3 2022, s. 78). Lisäksi epäkeskisyysehto (2.23) perustuu siihen, että koko tukimuurin pohja on sen toteutuessa puristettuna.

Kantokestävyysehdon (2.31) perusteella laskettiin kantokestävyyden ylimitoituskerroin kaavalla (5.1). Liukumiskestävyysehdon (2.32) perusteella laskettiin liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin kaavalla (5.2). " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehdon (2.40) perusteella laskettiin suhde $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$.

Koska tukimuurileveys *B* voi iterointitarkkuuden takia saada arvoja vain 0,1 m välein, mitoitustulos määräävälle ehdolle voi olla suhteellisen kaukanakin ehdon raja-arvosta. Esimerkiksi eräässä laskentatapauksessa eräällä mitoitustavalla kantokestävyyden ylimitoituskerroin oli jopa ODF_{KK} = 1,31, vaikka kantokestävyysehto (2.31) oli määräävä ehto mitoituksessa. Tämä johtui siitä, että 0,1 m pienempi tukimuurileveys olisi laskenut kantokestävyyden ylimitoituskertoimen ODF_{KK} alle 1,0, mikä johtui taas siitä, että avoimen tilan kantokestävyys oli niin epälineaarinen suhteessa anturaleveyteen *B*.

Tuloksissa on vertailtu pystydiagrammein leveyttä *B* eri mitoitustapojen välillä jokaisella laskentatapauksella. Lisäksi on taulukoitu jokaisella laskentatapauksella jokaisen mitoitustavan tuottamat tärkeimmät tulosparametrit: leveys *B*, leveyden *B* ja mitoitustavan DA2* leveyden B_{DA2*} suhde B/B_{DA2*} , kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{KK} , liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{LK} , suhteellinen epäkeskisyys kuormien mitoitusarvoilla $e_{B,d}/B$, kuormien ominaisarvoilla $e_{B,k}/B$ ja pysyvien kuormien ominaisarvoilla $e_{B,G,k}/B$, suhde T_{rep}/N_{rep} , määräävä kuormitusyhtälö (kuorm.yht.) ja määräävä kuormitustapaus (*Vmax / Vmin*).

Alaluvussa 5.2.1 esitetään maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien tulokset kuivassa tiiviissä moreenissa kolmella eri liikennekuormalla. Alaluvussa 5.2.2 esitetään laskentatapauksien tulokset kuivassa löyhässä hiekassa. Alaluvussa 5.2.3 esitetään laskentatapauksien tulokset kuivassa mursketäytössä siltin päällä. Alaluvussa 5.2.4 esitetään laskentatapauksien tulokset vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa. Alaluvussa 5.2.5 esitetään laskentatapauksien tulokset nulokset vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa. Alaluvussa 5.2.6 esitetään laskentatapauksien tulokset vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa. Alaluvussa 5.2.6 esitetään laskentatapauksien tulokset vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa.

Alaluvussa 5.2.7 esitetään yhteenveto maanvaraisen kulmatukimuurin 18 laskentatapauksen tuloksista sanallisesti. Lisäksi yhteenvedossa vertaillaan laskentatapauskohtaisesti mm. edullisinta ja epäedullisinta mitoitustapaa, leveyden *B* vaihteluväliä ja yleisintä määräävää mitoitusehtoa sekä verrataan mitoitustapojen suhteellista eroa mitoitustapaan DA2*, jota yleensä käytetään Suomessa anturaperustuksen GEO-murtorajatilojen mitoituksessa. Lopuksi vertaillaan " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehdon (2.40) vaikutusta kulmatukimuurin mitoitukseen tekemällä vertailu nykyistä mitoitustapaa DA2* oletetusti käyttökelpoisimpiin uusiin mitoitustapoihin (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* sekä mitoitustapojen (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmään rautatieliikennekuorman tapauksissa kaikissa kuudessa pohjaolosuhteessa. Oletettu käyttökelpoisuus perustuu siihen, että nämä mitoitustavat ovat lähellä nykyisiä mitoitustapoja DA2* ja DA3 ja että ne toimivat parhaiten numeerisilla menetelmillä. Numeerisilla menetelmillä syöttöparametrit eivät usein ole kuormia vaan mm. geometriaa ja tilavuuspainoja, joten osavarmuuslukuja on vaikea kohdistaa niihin.

Liitteessä B esitetään maanvaraisen kulmatukimuurin 18 laskentatapauksen yksityiskohtaisemmat mitoitustulokset jokaisella mitoitustavalla ja molemmilla kuormitusyhtälöillä (6.10a ja 6.10b tai 8.14a ja 8.14b) *Vmax-* ja *Vmin-*kuormitustapauksissa. Mitoitustulokset sisältävät mitoitusleveyden *B*, kulmatukimuuriin pystysuorasti ja vaakasuorasti kohdistuvien resultanttivoimien mitoitusarvot N_d ja T_d , kantokestävyyden ylimitoituskertoimen ODF_{KK} , liukumiskestävyyden ylimitoituskertoimen ODF_{LK} ja suhteellisen epäkeskisyyden mitoitusarvoilla $e_{B,d}/B$, ominaisarvoilla $e_{B,k}/B$ ja pysyvien kuormien ominaisarvoilla $e_{B,G,k}/B$. Lisäksi liite B sisältää mitoitustavoilla (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* kulmatukimuuriin pystysuorasti ja vaakasuorasti kohdistuvien resultanttivoimien edustavat arvot N_{rep} ja T_{rep} ja suhteen T_{rep}/N_{rep} .

5.2.1 Kuiva tiivis moreeni

Laskentatapaukset maanvaraiselle kulmatukimuurille kuivassa tiiviissä moreenissa rautatieliikennekuormalla, maantieliikennekuormalla ja ilman liikennekuormaa on esitetty luvussa 4.3.6 ja kuvassa 4.6. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on H_{muuri} = 3,0 m. Maanvaraisten kulmatukimuurien mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla esitetään pystydiagrammeina kuvassa 5.5. Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.



Kuva 5.5. Maanvaraisen kulmatukimuurin mitoitusleveys B kuivassa tiiviissä moreenissa. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Taulukossa 5.10 on esitetty rautatieliikennekuorman laskentatapauksen, taulukossa 5.11 maantieliikennekuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.12 ei liikennekuormaa -laskentatapauksen tärkeimmät tulosparametrit: leveys *B*, leveyden *B* ja mitoitustavan DA2* leveyden B_{DA2*} suhde B/B_{DA2*} , kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{KK} , liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{LK} , suhteellinen epäkeskisyys mitoitusarvoilla

 $e_{B,d}/B$, ominaisarvoilla $e_{B,k}/B$ ja pysyvien kuormien ominaisarvoilla $e_{B,G,k}/B$, " $T_{rep}/N_{rep} \leq$ 0,2"-ehdon suhde T_{rep}/N_{rep} , määräävä kuormitusyhtälö (kuorm.yht.) ja onko määräävä *Vmax-* vai *Vmin-*tapaus. Taulukoissa on merkitty keltaisella määräävä parametri.

/			01000111000	raatatioiiii	Connectuo	mana.		
Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
			+M11	+M21	+M2	+RFA	+RFA	+RFA*
<i>B</i> [m]	4,6	3,7	3,6	4,8	5,3	4,2	8,6	3,8
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	124 %	100 %	97 %	130 %	143 %	114 %	232 %	103 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,02	1,17	1,13	1,05	1,05	1,00	21,15	1,16
<i>ODF_{LK}</i> ≥ 1	1,25	1,12	1,17	1,23	1,18	1,30	2,50	1,12
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,18	0,17	0,22		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,21	0,23				0,04	0,19
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,06	0,06	0,04	0,04	0,05	0,01	0,06
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,44
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin
18.411 11 1 1 1	() ()	1 11.						

Taulukko 5.10. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle kuivassa tiiviissä moreenissa rautatieliikennekuormalla.

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Taulukko 5.11. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauks	selle
kuivassa tiiviissä moreenissa maantieliikennekuormalla.	_

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	VC4 +RFA*
<i>B</i> [m]	2,9	2,5	2,3	3,0	3,3	2,6	4,6	2,5
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	116 %	100 %	92 %	120 %	132 %	104 %	184 %	100 %
<i>ОDF_{КК}</i> ≥ 1	1,15	1,21	1,05	1,08	1,12	1,03	10,41	1,24
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,56	1,50	1,45	1,57	1,49	1,64	2,59	1,43
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,19	0,18	0,24		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,21	0,25				0,06	0,19
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,12	0,14	0,10	0,09	0,11	0,04	0,12
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,36
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
			+M1 ¹	+M2 ¹	+M2	+RFA	+RFA	+RFA*
<i>B</i> [m]	2,2	2,1	2,1	2,3	2,6	2,1	3,0	2,1
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	105 %	100 %	100 %	110 %	124 %	100 %	143 %	100 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,17	1,85	2,86	1,41	1,14	1,27	6,25	2,05
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,75	1,86	2,05	1,98	1,65	1,86	2,63	1,86
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,17	0,17	0,22		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,16	0,16				0,09	0,16
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,16	0,16	0,17	0,13	0,16	0,01	0,16
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,28
kuorm.yht.	6.10a	-	-	-	8.14a	8.14a	-	-
Vmax/Vmin	Vmin	-	-	-	Vmin	Vmin	Vmin	-

Taulukko 5.12. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle kuivassa tiiviissä moreenissa ilman liikennekuormaa.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa määräävä ehto oli mitoitustavalla (e) VC4+RFA " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehto (2.40) ja muilla mitoitustavoilla kantokestävyysehto (2.31) paitsi tapauksessa ilman liikennekuormaa mitoitustavoilla DA2* ja VC4+RFA* sekä mitoitustapojen (a) VC4+M1 ja (b) VC3+M2 yhdistelmällä epäkeskisyysehto (2.23) $e_{B,G,k}/B \le 1/6$ ". Mitoitustavoilla DA2*, (a) VC4+M1 ja VC4+RFA* kantokestävyys oli suurempi kuin mitoitustavoilla DA2, (c) VC1+M2 ja (d) VC1+RFA, koska kantokestävyys laskettiin kuormien ominaisarvoilla eikä mitoitusarvoilla. Mitoitustavalla (b) VC3+M2 kuormien osavarmuusluvut ovat pienemmät kuin mitoitustavoilla DA2 ja (c) VC1+M2. Täten kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODFKK oli suurempi ja määrääväksi ehdoksi tuli mitoitustavoilla DA2* ja VC4+RFA* sekä mitoitustapojen (a) VC4+M1 ja (b) VC3+M2 yhdistelmällä pysyvien kuormien epäkeskisyysehto (2.23) " $e_{B,G,k}/B \leq 1/6$ " laskentatapauksessa ilman liikennekuormaa (taulukko 5.12). Myös mitoitustavalla (d) VC1+RFA epäkeskisyys eB.G.K/B oli lähellä epäkeskisyysehdon (2.23) raja-arvoa, mutta koska kantokestävyysehto (2.31) ei olisi myöskään toteutunut 0,1 m pienemmällä tukimuurileveydellä, katsottiin kantokestävyysehto (2.31) määrääväksi ehdoksi (perustelut luvun 5.2 kolmannessa kappaleessa).

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa pienimmän tukimuurileveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2*, lisäksi maantieliikennekuorman tapauksessa VC4+RFA* ja tapauksessa ilman liikennekuormaa VC4+RFA* ja (*d*) VC1+RFA. Suurimman leveyden *B* tuotti aina mitoitustapa (*e*) VC4+RFA. Mitoitustavoilla, joilla kantokestävyysehto (2.31) oli määräävä, kantokestävyyden ylimitoituskerroin oli jopa $ODF_{KK} = 1,31$, koska avoimen tilan kantokestävyys oli niin epälineaarinen suhteessa tukimuurileveyteen *B* ja koska tukimuurileveyden *B* iterointitarkkuus oli 0,1 m.

Kuormitustapaus *Vmin* oli määräävä kaikilla mitoitustavoilla paitsi tapauksessa ilman liikennekuormaa (taulukko 5.12), kun kantokestävyyden sijaan määräävä ehto oli epäkeskisyysehto (2.23) " $e_{B,G,k}/B \le 1/6$ ". Epäkeskisyysehtoon (2.23) ei vaikuta kuormitusyhtälö tai kuormitustapaus, koska $e_{B,G,k}$ lasketaan pelkillä pysyvillä ominaiskuormilla. Kuormitustapaus *Vmin* oli määräävä, koska tukimuuriin kohdistui ilman liikennekuormaakin suuri vaakakuorma, mikä aiheutti sen, että epäkeskisyyden e_B maksimointi vaikutti (*Vmin*) kantokestävyyteen enemmän kuin pystykuormien maksimointi (*Vmax*). Lisäksi mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA määräävä kuormitustapaus oli aina *Vmin* " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "ehdon (2.40) takia.

Tukimuurin leveys *B* oli mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA 43–132 % suurempi, mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 24–43 % suurempi, mitoitustapojen (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmällä 10–30 % suurempi ja mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA 0–14 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Mitoitustavalla VC4+RFA*, jolla ei ole "*T_{rep}/N_{rep}* \leq 0,2"-ehtoa (2.40), tukimuurin leveys *B* oli 0–3 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla, vaikka kantokestävyyden osavarmuusluku oli pienempi (γ_{RN} = 1,4 vs. γ_{RN} = 1,55). Suurilla vaakakuormilla (rautatieliikennekuorman tapaus) VC4+RFA* oli epäedullisempi ja pienillä (ilman liikennekuormia) edullisempi suhteessa mitoitustapaan DA2*. Tämä johtui siitä, että mitoitustavoilla (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* käytettiin muuttuville kuormille osavarmuuslukua $\gamma_{Q,red}$ epäkeskisyyden *e*_B ja kuormakaltevuuskertoimien *i*_q ja *i*_V laskennassa. Lisäksi mitoitustavalla DA2* käytetään epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerrointa *ξ* kuormitusyhtälöllä 6.10b toisin kuin mitoitustavoilla (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* kuormitusyhtälöllä 8.14b.

Kun ei oteta huomioon mitoitustapaa *(e)* VC4+RFA, kaikissa kolmessa laskentatapauksessa mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuorman vaikutuksiin (DA2* ja VC4), oli leveys *B* pienempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuormiin (DA2, VC1 ja VC3). Lisäksi mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan kestävyyteen (DA2, DA2* ja RFA), oli leveys *B* pienempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan lujuuteen (M2). Missään kolmessa laskentatapauksessa liukumiskestävyysehto (2.32) ei ollut määräävä, koska kantokestävyys oli niin herkkä laskemaan vaakakuormien vaikutuksesta, että kantokestävyysehdon (2.31) raja-arvo saavutettiin tukimuurileveyttä *B* iteroitaessa ennen liukumiskestävyysehdon (2.32) raja-arvoa. Nämä seikat johtuivat siitä, että kulmatukimuurin kantokestävyys avoimessa tilassa on niin epälineaarinen vaakakuormien ja maan lujuuden suhteen.

5.2.2 Kuiva löyhä hiekka

Laskentatapaukset maanvaraiselle kulmatukimuurille kuivassa löyhässä hiekassa rautatieliikennekuormalla, maantieliikennekuormalla ja ilman liikennekuormaa on esitetty luvussa 4.3.6 ja kuvassa 4.7. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on H_{muuri} = 3,0 m. Maanvaraisten kulmatukimuurien mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla esitetään pystydiagrammeina kuvassa 5.6. Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.



Kuva 5.6. Maanvaraisen kulmatukimuurin mitoitusleveys B kuivassa löyhässä hiekassa. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Taulukossa 5.13 on esitetty rautatieliikennekuorman laskentatapauksen, taulukossa 5.14 maantieliikennekuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.15 ei liikennekuormaa -laskentatapauksen tärkeimmät tulosparametrit. Taulukoissa on merkitty keltaisella mää-räävä parametri.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
			+M1 ¹	+M2 ¹	+M2	+RFA	+RFA	+RFA*
<i>B</i> [m]	6,1	4,9	4,7	6,2	6,8	5,6	9,9	5,1
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	124 %	100 %	96 %	127 %	139 %	114 %	202 %	104 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,04	1,03	1,03	1,03	1,01	1,04	8,06	1,09
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,13	1,01	1,05	1,13	1,07	1,18	1,99	1,03
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,12	0,12	0,15		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,14	0,16				0,03	0,13
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	0,01	0,03
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,38
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin

Taulukko 5.13. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle kuivassa löyhässä hiekassa rautatieliikennekuormalla.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "Trep/Nrep ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Taulukko 5.14. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle kuivassa löyhässä hiekassa maantieliikennekuormalla.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	VC4 +RFA*
<i>B</i> [m]	3,7	3,3	3,0	3,9	4,2	3,4	5,1	3,3
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	112 %	100 %	91 %	118 %	127 %	103 %	155 %	100 %
<i>ΟDF_{KK}</i> ≥ 1	1,01	1,07	1,05	1,10	1,06	1,03	3,89	1,10
<i>ODF_{LK}</i> ≥ 1	1,43	1,42	1,36	1,53	1,42	1,54	2,08	1,36
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,13	0,12	0,16		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,14	0,17				0,06	0,13
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,07	0,09	0,06	0,05	0,07	0,03	0,07
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,30
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40). Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
			+M1 ¹	+M2 ¹	+M2	+RFA	+RFA	+RFA*
<i>B</i> [m]	2,8	2,5	2,2	2,8	3,2	2,6	3,1	2,4
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	112 %	100 %	88 %	112 %	128 %	104 %	124 %	96 %
<i>ОDF_{КК}</i> ≥ 1	1,12	1,06	1,06	1,11	1,03	1,05	2,14	1,03
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,72	1,71	1,66	1,93	1,63	1,78	2,11	1,65
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,11	0,12	0,15		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,12	0,15				0,08	0,13
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,12	0,15	0,11	0,09	0,11	0,08	0,13
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,26
kuorm.yht.	6.10a	6.10a	8.14a =8.14b	8.14a =8.14b	8.14a	8.14a	-	8.14a =8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmax	Vmax =Vmin	Vmax =Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmax =Vmin
1	- (-):- (-)	منالب امم ظميم						

Taulukko 5.15. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle kuivassa löyhässä hiekassa ilman liikennekuormaa.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40). Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa määräävä ehtö oli mitoitustavalla (e) VC4+RFA " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtö (2.40) ja muilla mitoitustavoilla kantokestävyysehtö (2.31). Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2* tai VC4+RFA* ja suurimman leveyden *B* tuotti mitoitustapa (e) VC4+RFA paitsi tapauksessa ilman liikennekuormaa mitoitustapa (c) VC1+M2. Mitoitustavoilla, joilla kantokestävyysehtö (2.31) oli määräävä, kantokestävyyden ylimitoituskerroin oli jopa $ODF_{KK} = 1,12$, koska avoimen tilan kantokestävyys oli niin epälineaarinen suhteessa tukimuurileveyteen *B* ja koska tukimuurileveyden *B* iterointitarkkuus oli 0,1 m. Määräävä kuormitustapaus *Vmax* tai *Vmin* määräytyi yleisesti samoin kuin kuivan tiiviin moreenin laskentatapauksessa (luku 5.2.1).

Tukimuurin leveys *B* oli mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA 24–102 % suurempi, mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 28–39 % suurempi, mitoitustapojen (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmällä 12–27 % suurempi ja mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA 3–14 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Mitoitustavalla VC4+RFA*, jolla ei ole " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40), tukimuurin leveys *B* erosi -4–4 % leveydestä mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Suurilla vaakakuormilla (rautatieliikennekuorman tapaus) VC4+RFA* oli epäedullisempi ja pienillä (ilman liikennekuormia) edullisempi kuin DA2*. Tämä johtui samoista syistä kuin luvussa 5.2.1.

Kuten kuivan tiiviin moreenin tapauksissa (luku 5.2.1), kaikissa kolmessa laskentatapauksessa mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuorman vaikutuksiin (DA2* ja VC4), oli leveys *B* pienempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuormiin (DA2, VC1 ja VC3), kun ei oteta huomioon mitoitustapaa *(e)* VC4+RFA. Lisäksi mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan kestävyyteen (DA2, DA2* ja RFA), oli leveys *B* pienempi tai yhtä suuri kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan lujuuteen (M2). Missään kolmessa laskentatapauksessa liukumiskestävyysehto (2.32) ei ollut määräävä, koska kantokestävyys oli niin herkkä laskemaan vaakakuormien vaikutuksesta, että kantokestävyysehdon (2.31) raja-arvo saavutettiin tukimuurilevyttä *B* iteroitaessa ennen liukumiskestävyysehdon (2.32) raja-arvoa.

5.2.3 Kuiva mursketäyttö siltin päällä

Laskentatapaukset maanvaraiselle kulmatukimuurille kuivassa mursketäytössä siltin päällä rautatieliikennekuormalla, maantieliikennekuormalla ja ilman liikennekuormaa on esitetty luvussa 4.3.6 ja kuvassa 4.8. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on H_{muuri} = 2,0 m. Maanvaraisten kulmatukimuurien mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla esitetään pystydiagrammeina kuvassa 5.7. Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.





Taulukossa 5.16 on esitetty rautatieliikennekuorman laskentatapauksen, taulukossa 5.17 maantieliikennekuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.18 ei liikennekuormaa -laskentatapauksen tärkeimmät tulosparametrit. Taulukoissa on merkitty keltaisella mää-räävä parametri.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RE∆	VC4 +REA*
<i>B</i> [m]	4,4	3,7	3,4	5,3	6,0	4,2	7,9	3,8
B/B _{DA2*} [%]	119 %	100 %	92 %	143 %	162 %	114 %	214 %	103 %
<i>ОDF_{КК}</i> ≥ 1	1,01	1,01	1,06	1,19	1,13	1,10	1,59	1,02
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,28	1,20	1,19	1,45	1,41	1,38	2,48	1,21
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,10	0,09	0,15		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,14	0,17				0,03	0,14
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,03	0,04	0,08	0,07	0,11	0,01	0,03
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,40
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmax

Taulukko 5.16. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle kuivassa mursketäytössä siltin päällä rautatieliikennekuormalla.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "Trep/Nrep ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Taulukko 5.17. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle kuivassa mursketäytössä siltin päällä maantieliikennekuormalla.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	VC4 +RFA*
<i>B</i> [m]	2,4	2,2	1,9	2,7	3,0	2,2	3,7	2,2
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	109 %	100 %	86 %	123 %	136 %	100 %	168 %	100 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,01	1,01	1,05	1,20	1,12	1,03	1,50	1,04
<i>ODF_{LK}</i> ≥ 1	1,60	1,63	1,49	1,74	1,66	1,71	2,59	1,56
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,14	0,13	0,20		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,16	0,21				0,06	0,16
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,08	0,10	0,13	0,11	0,16	0,03	0,08
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,32
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	I	8.14b
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmin	Vmax

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40). Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoituskseen kyseisellä mitoitustavalla.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	VC4 +RFA*
<i>B</i> [m]	1,6	1,5	1,5	1,7	1,9	1,5	2,1	1,5
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	107 %	100 %	100 %	113 %	127 %	100 %	140 %	100 %
<i>ОDF_{КК}</i> ≥ 1	1,03	1,03	1,60	1,37	1,01	1,04	1,52	1,14
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,87	1,96	2,15	2,14	1,77	1,96	2,70	1,96
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,15	0,16	0,21		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,16	0,16				0,09	0,16
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,16	0,16	0,15	0,12	0,16	0,09	0,16
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,19	0,27
kuorm.yht.	6.10a	6.10a	-	-	8.14a	8.14a	-	-
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	-	-	Vmax	Vmax	Vmin	-

Taulukko 5.18. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle kuivassa mursketäytössä siltin päällä ilman liikennekuormaa

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "Trep/Nrep ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta

mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa määräävä ehto oli mitoitustavalla (e) VC4+RFA " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehto (2.40) ja muilla mitoitustavoilla kantokestävyysehto (2.31) paitsi tapauksessa ilman liikennekuormaa mitoitustavalla VC4+RFA* sekä mitoitustapojen *(a)* VC4+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhdistelmällä epäkeskisyysehto (2.23) "e_{B.G.k}/B ≤ 1/6". Mitoitustavoilla (a) VC4+M1 ja VC4+RFA* kuormien vaikutusten mitoitusarvot E_d olivat pienempiä kuin mitoitustavoilla DA2 ja (c) VC1+M2, koska osavarmuusluvut kohdistettiin kuormien vaikutuksiin eikä kuormiin (pl. VC4:n yQ,red) ja osavarmuuden kohdistaminen maan lujuuteen (M2) lisää vaakakuormia. Mitoitustavalla (b) VC3+M2 kuormien osavarmuusluvut ovat pienemmät kuin mitoitustavoilla DA2 ja (c) VC1+M2. Täten kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{KK} oli suurempi ja määrääväksi ehdoksi tuli mitoitustavoilla VC4+RFA* sekä mitoitustapojen (a) VC4+M1 ja (b) VC3+M2 yhdistelmällä pysyvien kuormien epäkeskisyysehto (2.23) " $e_{B,G,k}/B \leq 1/6$ " laskentatapauksessa ilman liikennekuormaa (taulukko 5.18). Myös mitoitustavoilla DA2* ja *(d)* VC1+RFA epäkeskisyys e_{B.G.k}/B oli lähellä epäkeskisyysehdon (2.23) raja-arvoa, mutta koska kantokestävyysehto (2.31) ei olisi myöskään toteutunut 0,1 m pienemmällä tukimuurileveydellä, katsottiin kantokestävyysehto (2.31) määrääväksi ehdoksi (perustelut luvun 5.2 kolmannessa kappaleessa).

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa pienimmän leveyden B tuotti mitoitustapa DA2*, (d) VC1+RFA tai VC4+RFA* ja suurimman leveyden B tuotti mitoitustapa (e) VC4+RFA. Mitoitustavoilla, joilla kantokestävyysehto (2.31) oli määräävä, kantokestävyyden ylimitoituskerroin oli jopa ODF_{KK} = 1,20, koska suljetun tilan kantokestävyyskaavan (3.44) kuormakaltevuuskerroin i_{cu} (3.49) ei ole määritetty, kun vaakakuorma T on suurempi kuin tehokkaan pinta-alan ja suljetun leikkauslujuuden tulo $A'c_u$, ja koska tukimuurileveyden *B* iterointitarkkuus oli 0,1 m.

Kaikissa kolmessa laskentatapauksessa määräävä kuormitustapaus oli yleensä Vmax. Rautatieliikennekuorman laskentatapauksessa (taulukko 5.16) mitoitustavalla (b) VC3+M2 määräävän kuormitustapauksen Vmin (kuormitusyhtälö 8.14b) kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{KK} =1,190 oli melkein sama kuin Vmax kuormitustapauksen (kuormitusyhtälö 8.14b) ODF_{KK} =1,194 (liite B). Rautatieliikennekuorman ja maantieliikennekuorman laskentatapauksessa (taulukko 5.16) mitoitustavalla (a) VC4+M1 määräävä kuormitustapaus Vmin johtui VC4:n kuorman vaikutuksen N_d epäedullisesta osavarmuusluvusta ja muuttuvan kuorman osavarmuusluvun γ_{Q,red} käyttämisestä epäkeskisyyden e_B ja kuormakaltevuuskertoimen i_{cu} laskemisessa (mitoitustavalla VC4+RFA* näin ei käynyt, koska varmuuden kohdistaminen kestävyyteen kasvatti tukimuurileveyttä ja siten pienensi epäkeskisyyttä). Maantieliikennekuorman laskentatapauksessa (taulukko 5.17) mitoitustavalla (d) VC1+RFA määräävän kuormitustapauksen Vmin (kuormitusyhtälö 8.14b) kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{KK} =1,05 oli melkein sama kuin Vmax kuormitustapauksen (kuormitusyhtälö 8.14b) ODF_{KK} =1,03. Lisäksi määräävästä kuormitustapauksesta Vmax poikkesi laskentatapaus ilman liikennekuormaa (taulukko 5.18), kun kantokestävyyden sijaan määräävä ehto oli epäkeskisyysehto (2.23) "e_{B.G.k}/B ≤ 1/6". Lisäksi mitoitustavalla (e) VC4+RFA määräävä kuormitustapaus oli aina Vmin $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehdon (2.40) takia.

Tukimuurin leveys *B* oli mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA 40–114 % suurempi, mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 27–62 % suurempi, mitoitustapojen (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmällä 13–43 % suurempi ja mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA 0–14 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Mitoitustavalla VC4+RFA*, jolla ei ole ${}^{*}T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40), tukimuurin leveys *B* oli vain 0–3 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla kuten luvussa 5.2.1, vaikka kantokestävyyden osavarmuusluku oli pienempi ($\gamma_{RN} = 1,4$ vs. $\gamma_{RN} = 1,55$).

Kun ei oteta huomioon mitoitustapaa *(e)* VC4+RFA, kaikissa kolmessa laskentatapauksessa mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuorman vaikutuksiin (DA2* ja VC4), oli leveys *B* pienempi tai yhtä suuri kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuormiin (DA2, VC1 ja VC3). Lisäksi mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan kestävyyteen (DA2, DA2* ja RFA), oli leveys *B* pienempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan lujuuteen (M2). Missään kolmessa laskentatapauksessa liukumiskestävyysehto (2.32) ei ollut määräävä, koska kantokestävyys oli niin herkkä laskemaan vaakakuormien vaikutuksesta, että kantokestävyysehdon (2.31) rajaarvo saavutettiin tukimuurileveyttä *B* iteroitaessa ennen liukumiskestävyysehdon (2.32)

5.2.4 Vedellä kyllästynyt tiivis moreeni

Laskentatapaukset maanvaraiselle kulmatukimuurille vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa rautatieliikennekuormalla, maantieliikennekuormalla ja ilman liikennekuormaa on esitetty luvussa 4.3.6 ja kuvassa 4.7. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on $H_{muuri} = 3,0$ m. Maanvaraisten kulmatukimuurien mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla esitetään pystydiagrammeina kuvassa 5.8. Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.



Kuva 5.8. Maanvaraisen kulmatukimuurin mitoitusleveys B vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Taulukossa 5.19 on esitetty rautatieliikennekuorman laskentatapauksen, taulukossa 5.20 maantieliikennekuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.21 ei liikennekuormaa -laskentatapauksen tärkeimmät tulosparametrit. Taulukoissa on merkitty keltaisella mää-räävä parametri.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +REA	(e) VC4 +REA	VC4 +REA*
B [m]	5.0	4.0	<i>1</i> 1	5.0	55	13	8.0	
D [iii]	5,0	7,0	, ,,	5,0	0,0	+,5	0,0	– , i
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	125 %	100 %	103 %	125 %	138 %	108 %	200 %	103 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,44	1,32	1,86	1,02	1,07	1,05	11,03	1,33
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,01	1,01	1,00	1,08	1,04	1,13	1,96	1,01
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,15	0,14	0,18		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,16	0,16				0,04	0,15
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,01	0,04
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,38
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin

Taulukko 5.19. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa rautatieliikennekuormalla.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "Trep/Nrep ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Taulukko 5.20. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa maantieliikennekuormalla.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	VC4 +RFA*
<i>B</i> [m]	3,1	2,7	2,5	3,3	3,5	2,8	4,5	2,7
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	115 %	100 %	93 %	122 %	130 %	104 %	167 %	100 %
<i>ΟDF_{KK}</i> ≥ 1	1,12	1,14	1,13	1,09	1,06	1,18	5,85	1,16
<i>ODF_{LK}</i> ≥ 1	1,19	1,29	1,13	1,39	1,31	1,46	2,04	1,23
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,15	0,15	0,19		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,17	0,20				0,06	0,15
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,10	0,11	0,08	0,07	0,09	0,04	0,10
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,33
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40). Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Parametri	ΠΔ2	DA2*	(a) VC4	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
		DAL	+M1 ¹	+M2 ¹	+M2	+RFA	+RFA	+RFA*
<i>B</i> [m]	2,4	2,1	2,1	2,5	2,9	2,2	3,1	2,1
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	114 %	100 %	100 %	119 %	138 %	105 %	148 %	100 %
<i>ОDF_{КК}</i> ≥ 1	1,03	1,04	1,61	1,10	1,15	1,04	3,84	1,15
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,25	1,42	1,41	1,63	1,39	1,48	2,08	1,42
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,14	0,13	0,19		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,16	0,16				0,08	0,16
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,16	0,16	0,14	0,10	0,15	0,08	0,16
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,29
kuorm.yht.	6.10a	6.10a	-	8.14a =8.14b	8.14a	8.14a	-	8.14a =8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmax	-	Vmax =Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmax =Vmin

Taulukko 5.21. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle vedellä kyllästyneessä tiiviissä moreenissa ilman liikennekuormaa.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa määräävä ehtö oli mitoitustavalla (e) VC4+RFA " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtö (2.40) ja muilla mitoitustavoilla kantokestävyysehtö (2.31) paitsi rautatieliikennekuorman tapauksessa mitoitustavoilla DA2, DA2* ja VC4+RFA* liukumiskestävyysehtö (2.32). Rautatieliikennekuorman laskentatapauksessa mitoitustavoilla DA2, DA2* ja VC4+RFA* liukumiskestävyysehtö (2.32) oli määräävä ehtö, koska näillä mitoitustavoilla ei käytetä erillistä osavarmuuslukua veden aiheuttamille pysyville kuormille γ_{Gw} , toisin kuin mitoitustavoilla (c) VC1+M2 ja (d) VC1+RFA. Osavarmuusluvun γ_{Gw} takia vaakakuormat ja noste ovat pienemmät, joten liukumiskestävyyden ylimitoituskerröin on suurempi. Rautatieliikennekuorman laskentatapauksessa mitoitustapa (d) VC1+RFA tuottaa tämän osavarmuusluvun γ_{Gw} takia pienemmän tukimuurileveyden. Toisaalta mitoitustavoilla (b) VC3+M2 ja (c) VC1+M2 kantokestävyys on pienempi kuin muilla mitoitustavoilla maan lujuuteen kohdistettujen osavarmuuslukujen takia. Laskennan epälineaarisuuden takia lujuuteen (kitkakulma) kohdistettu osavarmuusluvun $\gamma_{q'} = 1,25$ vaikutus kertautuu paljon kantokestävyyden osavarmuuslukuja $\gamma_{R,v} = 1,55$ tai $\gamma_{RN} = 1,4$ suuremmaksi.

Rautatieliikennekuorman laskentatapauksessa myös mitoitustavalla (*a*) VC4+M1 liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin oli lähellä raja-arvoa samasta syystä, mutta koska mitoitustavoista (*a*) ja (*b*) epäedullisempi on määräävä, mitoitustapojen (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmän määräävä ehto on kantokestävyysehto (2.31). Mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 kantokestävyysehto (2.31) oli määräävä avoimen tilan kantokestävyyden epälineaarisuuden takia, vaikka kantokestävyyden ylimitoituskerroin $ODF_{KK} = 1,07$ oli pienempi kuin liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin $ODF_{KK} = 1,04$. Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2* tai VC4+RFA* ja suurimman leveyden *B* tuotti mitoitustapa (*e*) VC4+RFA. Mitoitustavoilla, joilla kantokestävyysehto (2.31) oli määräävä, kantokestävyyden ylimitoituskerroin oli jopa $ODF_{KK} = 1,16$, koska avoimen tilan kantokestävyys oli niin epälineaarinen suhteessa tukimuurileveyteen *B* ja koska tukimuurileveyden *B* iterointitarkkuus oli 0,1 m. Määräävä kuormitustapaus *Vmax* tai *Vmin* määräytyi yleisesti samoin kuin kuivan tiiviin moreenin laskentatapauksessa (luku 5.2.1). Tästä poikkesi laskentatapaus rautatieliikennekuormalla (taulukko 5.19), kun kantokestävyyden sijaan määräävä ehto oli liukumiskestävyysehto (2.32).

Tukimuurin leveys *B* oli mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA 48–100 % suurempi, mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 30–38 % suurempi, mitoitustapojen (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmällä 19–25 % suurempi ja mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA 4–8 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Mitoitustavalla VC4+RFA*, jolla ei ole " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40), tukimuurin leveys *B* oli 0–3 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla kuten luvussa 5.2.1, vaikka kantokestävyyden osavarmuusluku oli pienempi ($\gamma_{RN} = 1,4$ vs. $\gamma_{RN} = 1,55$).

Kun ei oteta huomioon mitoitustapaa *(e)* VC4+RFA, kaikissa kolmessa laskentatapauksessa mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuorman vaikutuksiin (DA2* ja VC4), oli leveys *B* pienempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuormiin (DA2, VC1 ja VC3). Lisäksi mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan kestävyyteen (DA2, DA2* ja RFA), oli leveys *B* pienempi tai yhtä suuri kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan lujuuteen (M2).

5.2.5 Vedellä kyllästynyt löyhä hiekka

Laskentatapaukset maanvaraiselle kulmatukimuurille vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa rautatieliikennekuormalla, maantieliikennekuormalla ja ilman liikennekuormaa on esitetty luvussa 4.3.6 ja kuvassa 4.7. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on H_{muuri} = 3,0 m. Maanvaraisten kulmatukimuurien mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla esitetään pystydiagrammeina kuvassa 5.9. Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.





Taulukossa 5.22 on esitetty rautatieliikennekuorman laskentatapauksen, taulukossa 5.23 maantieliikennekuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.24 ei liikennekuormaa -laskentatapauksen tärkeimmät tulosparametrit. Taulukoissa on merkitty keltaisella mää-räävä parametri.

	veuenu r	yndolynol					Skuormun	<i>.</i>
Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	VC4 +RFA*
<i>B</i> [m]	7,4	5,9	6,1	6,9	7,6	6,0	9,4	6,1
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	125 %	100 %	103 %	117 %	129 %	102 %	159 %	103 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,68	1,33	1,95	1,05	1,12	1,05	4,26	1,39
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,01	1,01	1,01	1,05	1,01	1,06	1,56	1,01
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,09	0,08	0,11		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,09	0,09				0,03	0,08
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,31
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin
A								

 Taulukko 5.22. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa rautatieliikennekuormalla.

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "*T_{rep}/N_{rep}* ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Daramotri		DA2*						
Falameur	DAZ	DAZ	(a) VC4 +M1 ¹	(D) VC3 +M2 ¹	(C) VC1 +M2		+DEV	+DEV*
			· 1¥1 1	· IVIZ	· IVIZ			
<i>B</i> [m]	4,3	3,9	3,5	4,5	4,8	3,9	5,2	3,8
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	110 %	100 %	90 %	115 %	123 %	100 %	133 %	97 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,06	1,06	1,07	1,01	1,02	1,10	2,27	1,00
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,14	1,30	1,10	1,36	1,29	1,41	1,64	1,20
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,09	0,09	0,11		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,09	0,12				0,05	0,09
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,05	0,07	0,05	0,04	0,05	0,03	0,06
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,27
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmin

Taulukko 5.23. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa maantieliikennekuormalla.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "Trep/Nrep ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Taulukko 5.24. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle vedellä kyllästyneessä löyhässä hiekassa ilman liikennekuormaa.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4	VC4
			+W11'	+IVI2'	+W2	+KFA	+RFA	+KFA*
<i>B</i> [m]	3,4	3,2	2,7	3,5	3,9	3,1	3,5	3,0
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	106 %	100 %	84 %	109 %	122 %	97 %	109 %	94 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,07	1,08	1,04	1,05	1,02	1,05	1,48	1,01
<i>ODF_{LK}</i> ≥ 1	1,27	1,54	1,25	1,70	1,40	1,50	1,69	1,45
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,08	0,08	0,10		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,08	0,11				0,07	0,09
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,08	0,11	0,08	0,06	0,08	0,07	0,09
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,23
kuorm.yht.	6.10a	6.10a	8.14a =8.14b	8.14a =8.14b	8.14a	8.14a	-	8.14a =8.14b
Vmax/Vmin	Vmin	Vmax	Vmax =Vmin	Vmax =Vmin	Vmin	Vmin	Vmin	Vmax =Vmin

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa määräävä ehto oli mitoitustavalla (e) VC4+RFA " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehto (2.40) ja muilla mitoitustavoilla kantokestävyysehto (2.31) paitsi rautatieliikennekuorman tapauksessa mitoitustavoilla DA2, DA2*, (c) VC1+M2 ja VC4+RFA* liukumiskestävyysehto (2.32). Mitoitustavoilla DA2, DA2*, (c) VC1+M2 ja VC4+RFA* liukumiskestävyysehto (2.32) oli määräävä ehto rautatieliikennekuorman tapauksessa samasta syystä kuin vedellä kyllästyneen tiiviin moreenin (luku 5.2.4) tapauksessa. Mitoitustavan (a) VC4+M1 määräävä ehto katsottiin yhdistelmän (a) VC4+M1 ja (b) VC3+M2 mukaan olevan kantokestävyysehto (2.31) kuten vedellä kyllästyneen tiiviin moreenin (luku 5.2.4) tapauksessa. Toisaalta löyhä hiekan ($\varphi'_k = 32^\circ$) tiivistä moreenia ($\varphi'_k = 38^\circ$) pienempi kitkakulma aiheuttaa suuremmat vaakakuormat ja pienemmän rakenteen ja maan välisen kitkakulman, joten kaikilla mitoitustavoilla oli lähellä rautatieliikennekuorman tapauksessa, että liukumiskestävyysehto (2.32) olisi ollut määräävä. Tämän takia mitoitustavalla *(c)* VC1+M2 määräävä ehto on liukumiskestävyysehto (2.32). Mitoitustavalla *(b)* VC3+M2 kantokestävyysehto (2.31) pysyi määräävänä ehtona pienempien kuormaosavarmuuslukujen takia. Mitoitustavalla *(d)* VC1+RFA kantokestävyysehto (2.31) pysyi määräävänä ehtona, koska osavarmuusluvut kohdistetaan kestävyyteen maan lujuuden sijaan.

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2* tai VC4+RFA* ja suurimman leveyden *B* tuotti mitoitustapa *(e)* VC4+RFA paitsi tapauksessa ilman liikennekuormaa mitoitustapa *(c)* VC1+M2. Määräävä kuormitustapaus *Vmax* tai *Vmin* määräytyi yleisesti samoin kuin kuivan tiiviin moreenin laskentatapauksessa (luku 5.2.1). Tästä poikkesi laskentatapaus rautatieliikennekuormalla (taulukko 5.22), kun kantokestävyyden sijaan määräävä ehto oli liukumiskestävyysehto (2.32).

Tukimuurin leveys *B* oli mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA 9–59 % suurempi, mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 22–29 % suurempi, mitoitustapojen (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmällä 9–17 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA tukimuurin leveys *B* erosi vain -3–2 % leveydestä mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla, mikä johtui erillisestä osavarmuusluvusta veden aiheuttamille pysyville kuormille γ_{Gw} (tarkemmin luvussa 5.2.4). Mitoitustavalla VC4+RFA*, jolla ei ole " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40), tukimuurin leveys *B* erosi -6–3 % leveydestä mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla, vaikka kantokestävyyden osavarmuusluku oli pienempi ($\gamma_{RN} = 1,4$ vs. $\gamma_{RN} = 1,55$). Suurilla vaakakuormilla (rautatieliikennekuorman tapaus) VC4+RFA* oli epäedullisempi ja pienillä (ilman liikennekuormia) edullisempi kuin DA2*. Tämä johtui muuttuvien kuormien osavarmuusluvusta $\gamma_{Q,red}$ ja pienennyskertoimesta ξ (tarkemmin luvussa 5.2.1). Näistä syistä myös (*d*) VC1+RFA oli edullisempi kuin VC4+RFA* suurilla vaakakuormilla (rautatieliikennekuorman tapaus).

Kun ei oteta huomioon mitoitustapaa (e) VC4+RFA ja rautatieliikennekuorman tapauksessa mitoitustapaa VC4+RFA*, kaikissa kolmessa laskentatapauksessa mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan kestävyyteen (DA2, DA2* ja RFA), oli leveys *B* pienempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan lujuuteen (M2). Missään kolmessa laskentatapauksessa epäkeskisyys ei ollut määräävä ehto, koska kantokestävyys oli niin herkkä laskemaan vaakakuormien vaikutuksesta, että kantokestävyysehdon (2.31) raja-arvo saavutettiin tukimuurileveyttä *B* iteroitaessa ennen epäkeskisyysehtojen raja-arvoja.

5.2.6 Vedellä kyllästynyt mursketäyttö siltin päällä

Laskentatapaukset maanvaraiselle kulmatukimuurille vedellä kyllästyneessä mursketäytössä siltin päällä rautatieliikennekuormalla, maantieliikennekuormalla ja ilman liikennekuormaa on esitetty luvussa 4.3.6 ja kuvassa 4.7. Kulmatukimuurin pystymuurin korkeus on $H_{muuri} = 2,0$ m. Maanvaraisten kulmatukimuurien mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla esitetään pystydiagrammeina kuvassa 5.10. Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.



Kuva 5.10. Maanvaraisen kulmatukimuurin mitoitusleveys B vedellä kyllästyneessä mursketäytössä siltin päällä. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Taulukossa 5.25 on esitetty rautatieliikennekuorman laskentatapauksen, taulukossa 5.26 maantieliikennekuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.27 ei liikennekuormaa -laskentatapauksen tärkeimmät tulosparametrit. Taulukoissa on merkitty keltaisella mää-räävä parametri.
Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	VC4 +RFA*
<i>B</i> [m]	4,7	3,9	3,8	5,3	6,0	4,2	7,3	4,0
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	121 %	100 %	97 %	136 %	154 %	108 %	187 %	103 %
<i>ОDF_{КК}</i> ≥ 1	1,01	1,00	1,34	1,07	1,04	1,05	1,41	1,02
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,03	1,07	1,01	1,23	1,21	1,18	1,95	1,07
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,09	0,08	0,13		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,11	0,12				0,03	0,11
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,03	0,03	0,07	0,06	0,10	0,01	0,02
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,35
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmax

Taulukko 5.25. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle vedellä kyllästyneessä mursketäytössä siltin päällä rautatieliikennekuormalla.

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "Trep/Nrep ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Taulukko 5.26. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle vedellä kyllästyneessä mursketäytössä siltin päällä maantieliikennekuormalla.

Parametri	DA2	DA2*	(a) VC4 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	VC4 +RFA*
<i>B</i> [m]	2,6	2,4	2,0	2,7	3,0	2,3	3,6	2,3
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	108 %	100 %	83 %	113 %	125 %	96 %	150 %	96 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,02	1,03	1,15	1,04	1,03	1,08	1,35	1,02
<i>ODF_{LK}</i> ≥ 1	1,25	1,43	1,14	1,41	1,38	1,47	2,04	1,31
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,13	0,12	0,16		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,12	0,18				0,06	0,14
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,06	0,09	0,12	0,10	0,14	0,03	0,07
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,20	0,30
kuorm.yht.	6.10b	6.10b	8.14b	8.14b	8.14b	8.14b	-	8.14b
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmax

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40). Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Daramotri		DA2*	(a) VCA	(h) VC3	(a) VC1			VCA
Falameur	DAZ	DAZ	(a) VC4 +M1 ¹	(D) VC3 +M2 ¹	(C) VC1 +M2		+DEV	+DEV*
			· 1¥1 1	· 1412	· IVI Z			
<i>B</i> [m]	1,8	1,6	1,5	1,7	2,1	1,6	2,2	1,5
<i>B/B_{DA2*}</i> [%]	113 %	100 %	94 %	106 %	131 %	100 %	138 %	94 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1	1,05	1,00	1,43	1,14	1,06	1,05	1,41	1,02
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,37	1,57	1,47	1,62	1,47	1,56	2,14	1,47
e _{B,d} /B ≤ 1/3				0,15	0,12	0,17		
e _{B,k} /B ≤ 1/3		0,13	0,15				0,07	0,15
e _{B,G,k} /B ≤ 1/6		0,13	0,15	0,15	0,10	0,13	0,07	0,15
$T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$							0,19	0,28
kuorm.yht.	6.10a	6.10a	-	8.14a =8.14b	8.14a	8.14a	-	8.14a =8.14b
Vmax/Vmin	Vmax	Vmax	-	Vmax =Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmax =Vmin

Taulukko 5.27. Tärkeimmät tulosparametrit maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukselle vedellä kyllästyneessä mursketäytössä siltin päällä ilman liikennekuormaa.

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman "*T_{rep}/N_{rep}* ≤ 0,2"-ehtoa (2.40).

Määräävä parametri on merkitty keltaisella. Harmaalla on merkitty parametrit, jotka eivät vaikuta mitoitukseen kyseisellä mitoitustavalla.

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa määräävä ehto oli mitoitustavalla (e) VC4+RFA " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehto (2.40) ja muilla mitoitustavoilla kantokestävyysehto (2.31). Mitoitustavoista (a) VC4+M1 ja (b) VC3+M2 epäedullisemman määräävä ehto on mitoitustapojen (a) ja (b) yhdistelmän määräävä ehto.

Kaikissa kolmessa liikennekuormatapauksessa pienimmän leveyden *B* tuotti mitoitustapa DA2* tai VC4+RFA* ja suurimman leveyden *B* tuotti mitoitustapa (*e*) VC4+RFA. Mitoitustavoilla, joilla kantokestävyysehto (2.31) oli määräävä, kantokestävyyden ylimitoituskerroin oli jopa $ODF_{KK} = 1,15$. Tämä johtui siitä, että suljetun tilan kantokestävyyskaavan (3.44) kuormakaltevuuskerroin *i*_{cu} (3.49) ei ole määritetty, kun vaakakuorma *T* on suurempi kuin tehokkaan pinta-alan ja suljetun leikkauslujuuden tulo *A*'*c*_u, ja koska tukimuurileveyden *B* iterointitarkkuus oli 0,1 m.

Määräävä kuormitustapaus *Vmax* tai *Vmin* määräytyi yleisesti samoin kuin kuivan mursketäytön siltin päällä -laskentatapauksessa (luku 5.2.3). Tästä poikkesi laskentatapaus rautatieliikennekuormalla (taulukko 5.25), kun kantokestävyyden sijaan määräävä ehto oli liukumiskestävyysehto (2.32).

Tukimuurin leveys *B* oli mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA 38–87 % suurempi, mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 25–54 % suurempi, mitoitustapojen (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmällä 6–36 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA tukimuurin leveys *B* erosi vain -4–8 % leveydestä mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla, mikä johtui erillisestä osavarmuusluvusta veden aiheuttamille pysyville kuormille γ_{Gw} (tarkemmin luvussa 5.2.4). Mitoitustavalla VC4+RFA*, jolla ei ole " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40), tukimuurin leveys *B* erosi -6–3 % leveydestä mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla, vaikka kantokestävyyden osavarmuusluku oli pienempi ($\gamma_{RN} = 1,4$ vs. $\gamma_{RN} = 1,55$). Suurilla vaakakuormilla (rautatieliikennekuorman tapaus) VC4+RFA* oli epäedullisempi ja pienillä (ilman liikennekuormia) edullisempi kuin DA2*. Tämä johtui muuttuvien kuormien osavarmuusluvusta $\gamma_{Q,red} = ja$ pienennyskertoimesta ξ (tarkemmin luvussa 5.2.1).

5.2.7 Yhteenveto maanvaraisen kulmatukimuurin tuloksista

Maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksissa taloudellisimman eli pienimmän leveyden *B* tuottivat mitoitustavat DA2* ja VC4+RFA*. Rautatieliikennekuorman laskentatapauksissa taloudellisin oli aina mitoitustapa DA2*. Tämä johtui siitä, että mitoitustavoilla (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* käytettiin muuttuville kuormille osavarmuuslukua $\gamma_{Q,red}$ epäkeskisyyden *e*_B ja kuormakaltevuuskertoimien *i*_q ja *i*_V laskennassa. Lisäksi mitoitustavalla DA2* käytetään epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerrointa ξ kuormitusyhtälöllä 6.10b toisin kuin mitoitustavoilla (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* kuormitusyhtälöllä 8.14b.

Mitoitustapojen *(a)* VC4+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhdistelmästä mitoitustapa *(a)* VC4+M1 oli aina edullisempi. Epätaloudellisimman eli suurimman leveyden *B* tuotti mitoitustapa *(e)* VC4+RFA paitsi löyhän hiekan tapauksissa ilman liikennekuormaa *(c)* VC1+M2. Laskentatapauksen suurimman leveyden *B* suhteellinen ero pienimpään leveyteen *B* mitoitustapojen välillä eli *B*:n vaihteluväli-% sai arvoja eri laskentatapauksissa välillä 30–132 %.

Yleisin määräävä ehto laskentatapauksissa oli kantokestävyysehto (2.31). Rautatieliikennekuorman kahdessa vedellä kyllästyneen karkearakeisen maan tapauksessa (luvut 5.2.4 ja 5.2.5) liukumiskestävyysehto (2.32) oli yleisin ehto, koska huokosveden aiheuttama vaakakuorma ja noste pienensivät liukumiskestävyyden ylimitoituskerrointa. Kuivan tiiviin moreenin tapauksessa ilman liikennekuormaa epäkeskisyysehto (2.23) " $e_{B,G,k}/B \le 1/6$ " oli yleisin ehto, koska tukimuurileveys *B* oli pieni suhteessa vaakakuorman momenttivarteen *y*.

Rautatie- ja maantieliikennekuormalla määräävä kuormitusyhtälö oli aina 6.10b tai 8.14b ja ilman liikennekuormaa aina 6.10a tai 8.14a paitsi silloin, kun määräävä ehto oli pysyvien ominaiskuormien epäkeskisyysehto (2.23) " $e_{B,G,k}/B \le 1/6$ ", jolloin kuormitusyhtälöllä ei ollut väliä. Lisäksi mitoitustavalla VC4 8.14a ja 8.14b eivät eroa toisistaan, jos muuttuvia kuormia ei ole, koska VC4 ei käytä pienennyskerrointa ξ . *Vmin*-kuormitustapaus oli useammin määräävä kuin *Vmax*-tapaus. Syyt määräävälle kuormitusyhtälölle ja kuormitustapaukselle vaihtelivat ja ne on esitetty laskentatapauskohtaisesti (luvut 5.2.1–5.2.6).

Taulukossa 5.28 on esitetty vertailu mitoitustavoista maanvaraisen kulmatukimuurin rautatieliikennekuorman laskentatapauksista, taulukossa 5.29 maantieliikennekuorman laskentatapauksista ja taulukossa 5.30 laskentatapauksista ilman liikennekuormaa.

i	ilman "T _{rep} /N _{re}	_₽ ≤ 0,2"-ehtoa	(2.40).			
Rautatielii-	Kuiva			Vedellä kyllä	ästynyt	
kenne- kuorma	Tiivis mo- reeni	Löyhä hiekka	Murske- täyttö siltin päällä	Tiivis mo- reeni	Löyhä hiekka	Murske- täyttö siltin päällä
Edullisim- mat mitoi- tustavat ¹	DA2*	DA2*	DA2*	DA2*	DA2*	DA2*
Epäedulli- simmat mi- toitustavat ²	VC4+RFA	VC4+RFA	VC4+RFA	VC4+RFA	VC4+RFA	VC4+RFA
<i>B</i> :n vaihtelu- väli-% ³	132 %	102 %	114 %	100 %	59 %	87 %
Yleisin mää- räävä ehto (kpl)⁴	kantokestä- vyys (7)	kantokestä- vyys (7)	kantokestä- vyys (7)	liukumis- kestävyys (4)	liukumis- kestävyys (5)	kantokestä- vyys (6)
Määräävä k.yht. (kpl)⁵	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7
Vmax/Vmin ⁶	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 5, Vmin: 3	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 5, Vmin: 3

Taulukko 5.28. Mitoitustapojen vertailutaulukko maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauk-
sista rautatieliikennekuormalla. VC4+RFA* viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA
ilman " $T_{ren}/N_{ren} \leq 0.2$ "-ehtoa (2.40).

¹ Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen pienin leveys B. Mitoitustavat (a) VC4+M1 ja (b) VC3+M2 tarkastellaan yhdessä. ² Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen suurin leveys *B*. Mitoitustavat (a) ja (b) tarkastellaan yhdessä.

³ Laskentatapauksen suurimman leveyden suhteellinen ero pienimpään leveyteen mitoitustapojen välillä.

⁴ Laskentatapauksen yleisin määräävä ehto (kantokestävyys, liukumiskestävyys tai epäkeskisyys) mitoitustavoilla ja tämän määrä.

⁵ Laskentatapauksen määrät siitä, kuinka monella mitoitustavalla a eli 6.10a tai 8.14a on määräävä kuormitusyhtälö ja kuinka monella b eli 6.10b tai 8.14b. ⁶ Laskentatapauksen määrät siitä, kuinka monella mitoitustavalla *Vmax-*tapaus on määräävä ja kuinka monella

Vmin-tapaus.

Taulukko 5.29. Mitoitustapojen vertailutaulukko maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksista maantieliikennekuormalla. VC4+RFA* viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{ren}/N_{ren} \leq 0.2$ "-ehtoa (2.40).

Maantielii-	Kuiva			Vedellä kyllä	stynyt	
kenne- kuorma	Tiivis mo- reeni	Löyhä hiekka	Murske- täyttö siltin päällä	Tiivis mo- reeni	Löyhä hiekka	Murske- täyttö siltin päällä
Edullisim-	DA2*,	DA2*,	DA2*,	DA2*,	VC4+RFA*	VC4+RFA*
mat mitoi- tustavat ¹	VC4+RFA*	VC4+RFA*	VC4+RFA*	VC4+RFA*		
Epäedulli- simmat mi- toitustavat ²	VC4+RFA	VC4+RFA	VC4+RFA	VC4+RFA	VC4+RFA	VC4+RFA
<i>B</i> :n vaihtelu- väli-% ³	84 %	55 %	68 %	67 %	37 %	57 %
Yleisin mää- räävä ehto (kpl) ⁴	kantokestä- vyys (7)	kantokestä- vyys (7)	kantokestä- vyys (7)	kantokestä- vyys (7)	kantokestä- vyys (7)	kantokestä- vyys (7)
Määräävä k.yht. (kpl)⁵	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7	a: 0, b: 7
Vmax/Vmin ⁶	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 5, Vmin: 3	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 0, Vmin: 8	Vmax: 5, Vmin: 3

¹ Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen pienin leveys *B*. Mitoitustavat (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 tarkastellaan yhdessä.

Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen suurin leveys B. Mitoitustavat (a) ja (b) tarkastellaan yhdessä.

³ Laskentatapauksen suurimman leveyden suhteellinen ero pienimpään leveyteen mitoitustapojen välillä.

⁴ Laskentatapauksen yleisin määräävä ehto (kantokestävyys, liukumiskestävyys tai epäkeskisyys) mitoitustavoilla ja tämän määrä.

 $^{\scriptscriptstyle 5}$ Laskentatapauksen määrät siitä, kuinka monella mitoitustavalla a eli 6.10a tai 8.14a on määräävä kuormitusyhtälö ja kuinka monella b eli 6.10b tai 8.14b. ⁶ Laskentatapauksen määrät siitä, kuinka monella mitoitustavalla *Vmax*-tapaus on määräävä ja kuinka monella

Vmin-tapaus.

Taulukko 5.30. Mitoitustapojen vertailu	itaulukko maanv	araisen kulmatukim	uurin laskentatapauk-
sista ilman liikennekuorn	naa. VC4+RFA*	viittaa mitoitusyhdis	stelmään VC4+RFA il-
man " $T_{mn}/N_{mn} \leq 0.2$ "-ehte	oa (2.40)	-	

1	nan reprivrep	<u>⊐</u> 0,2 -entoa	(2.70).			
Ei liikenne-	Kuiva			Vedellä kyllä	stynyt	
kuormaa	Tiivis mo-	Löyhä	Murske-	Tiivis mo-	Löyhä	Murske-
	reeni	hiekka	täyttö siltin päällä	reeni	hiekka	täyttö siltin päällä
Edullisim-	DA2*,	VC4+RFA*	DA2*,	DA2*,	VC4+RFA*	VC4+RFA*
mat mitoi-	VC1+RFA,		VC1+RFA,	VC4+RFA*		
tustavat ¹	VC4+RFA*		VC4+RFA*			
Epäedulli-	VC4+RFA	VC1+M2	VC4+RFA	VC4+RFA	VC1+M2	VC4+RFA
simmat mi-						
toitustavat ²						
B:n vaihtelu-	43 %	33 %	40 %	48 %	30 %	47 %
väli-%³						
Yleisin mää-	epäkeski-	kantokestä-	kantokestä-	kantokestä-	kantokestä-	kantokestä-
räävä ehto	syys (4)	vyys (7)	vyys (4)	vyys (6)	vyys (7)	vyys (6)
(kpl) ⁴						
Määräävä	a: 3, b: 0	a: 7, b: 3	a: 4, b: 0	a: 6, b: 2	a: 7, b: 3	a: 6, b: 2
k.yht. (kpl)⁵						
Vmax/Vmin ⁶	Vmax: 0,	Vmax: 3,	Vmax: 4,	Vmax: 3,	Vmax: 4,	Vmax: 6,
	Vmin: 4	Vmin: 4	Vmin: 1	Vmin: 6	Vmin: 7	Vmin: 3

¹ Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen pienin leveys B. Mitoitustavat (a) VC4+M1 ja (b) VC3+M2 tarkastellaan yhdessä.

Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen suurin leveys B. Mitoitustavat (a) ja (b) tarkastellaan yhdessä.

³ Laskentatapauksen suurimman leveyden suhteellinen ero pienimpään leveyteen mitoitustapojen välillä.

⁴ Laskentatapauksen yleisin määräävä ehto (kantokestävyys, liukumiskestävyys tai epäkeskisyys) mitoitustavoilla ja tämän määrä.

⁵ Laskentatapauksen määrät siitä, kuinka monella mitoitustavalla a eli 6.10a tai 8.14a on määräävä kuormitusyhtälö ja kuinka monella b eli 6.10b tai 8.14b. Kun kuormitusyhtälöt ovat identtiset, molemmat lasketaan.

Laskentatapauksen määrät siitä, kuinka monella mitoitustavalla Vmax-tapaus on määräävä ja kuinka monella Vmin-tapaus. Kun tapaukset ovat identtiset, molemmat lasketaan.

Nykyisin Suomessa käytetään usein mitoitustapaa DA2* kulmatukimuurin GEO-murtorajatilojen mitoituksessa. Vertailua varten on laskettu jokaisen (n = 18) laskentatapauksen *i* jokaiselle mitoitustavalle *j* leveyden $B_{i,j}$ ja mitoitustavan DA2* leveyden $B_{i,DA2*}$ avulla keskimääräinen suhteellinen ero \bar{v}_j mitoitustapaan DA2* kaavalla (5.3). Kuvassa 5.11 on esitetty maanvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien leveyden *B* keskimääräinen suhteellinen ero \bar{v} eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2*.

Huomataan, että tämän työn laskentatapauksissa mitoitustapa *(e)* VC4+RFA tuotti keskimäärin 64 %, mitoitustapa *(c)* VC1+M2 34 %, mitoitustapojen *(a)* VC4+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhdistelmä 20 %, mitoitustapa DA2 15 % ja mitoitustapa *(d)* VC1+RFA 4 % suuremman leveyden *B* kulmatukimuurille kuin mitoitustapa DA2*. Mitoitustapa VC4+RFA* tuotti keskimäärin saman leveyden *B* kuin mitoitustapa DA2*.



Kuva 5.11. Tukimuurileveyden B kaikkien laskentatapauksien keskimääräinen suhteellinen ero ⊽ eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2*. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Mitoitustavoilla DA2, (*b*) VC3+M2, (*c*) VC1+M2 ja (*d*) VC1+RFA tukimuurileveyttä *B* kasvattaa osavarmuuslukujen kohdistaminen kuormiin kuormien vaikutusten sijaan. Toisaalta (*d*) VC1+RFA (γ_{RN} = 1,4) tuottaa mitoitustapaa DA2 ($\gamma_{R,v}$ = 1,55) keskimäärin pienemmän tukimuurileveyden pienemmän kantokestävyyden osavarmuusluvun takia. Mitoitustavoilla (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 tukimuurileveyttä *B* kasvattaa lisäksi maan lujuuksiin kohdistetut osavarmuusluvut $\gamma_{\varphi'}$ = 1,25 ja γ_{cu} = 1,4, joiden vaikutukset kertautuvat paljon kantokestävyyden osavarmuuslukuja $\gamma_{R,v}$ = 1,55 tai γ_{RN} = 1,4 suuremmiksi tukimuurin kantokestävyyslaskennan epälineaarisuuden takia. Edellä mainituista syistä mitoitustapa (*a*) VC4+M1 tuottaisi yksinään keskimäärin kapeamman tukimuurin. Mitoitustapa (e) VC4+RFA tuotti yksittäisissä tapauksissa jopa 132 % ja keskimäärin 64 % suuremman tukimuurileveyden kuin mitoitustapa DA2*. Ilman " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehtoa (2.40) mitoitustavan VC4+RFA* tukimuurileveys ei eronnut juuri lainkaan mitoitustavasta DA2*, vaikka kantokestävyyden osavarmuusluku oli pienempi ($\gamma_{RN} = 1,4$ vs. $\gamma_{R,v} = 1,55$). Tämä johtui siitä, että mitoitustavoilla (e) VC4+RFA ja VC4+RFA* käytettiin muuttuville kuormille osavarmuuslukua $\gamma_{Q,red}$ epäkeskisyyden e_B ja kuormakaltevuuskertoimien i_q ja i_{γ} laskennassa. Lisäksi mitoitustavalla DA2* käytetään epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerrointa ξ kuormitusyhtälöllä 6.10b toisin kuin mitoitustavoilla (e) VC4+RFA

Rautatieliikennekuorman aiheuttamalla suurella vaakakuorman edustavalla arvolla T_{rep} " $T_{rep}/N_{rep} \leq 0,2$ "-ehdon (2.40) merkitys korostuu erityisesti tukimuurileveydelle *B*. Tämän takia kuvassa 5.12 on vertailtu nykyistä mitoitustapaa DA2* oletetusti käyttökelpoisimpiin uusiin mitoitustapoihin (*e*) VC4+RFA ja VC4+RFA* sekä mitoitustapojen (*a*) VC4+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmään rautatieliikennekuorman tapauksissa kaikissa kuudessa pohjaolosuhteessa. Oletettu käyttökelpoisuus perustuu siihen, että nämä mitoitustavat ovat lähellä nykyisiä mitoitustapoja DA2* ja DA3 ja että ne toimivat parhaiten numeerisilla menetelmillä. Numeerisilla menetelmillä syöttöparametrit eivät usein ole kuormia vaan mm. geometriaa ja tilavuuspainoja, joten osavarmuuslukuja on vaikea kohdistaa niihin.



Kuva 5.12. Tukimuurileveyden B vertailu nykyisen mitoitustavan DA2* ja oletetusti käyttökelpoisimpien uusien mitoitustapojen välillä rautatieliikennekuorman tapauksissa. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

5.3 Nosturin tukijalka maanvaraisesti (GEO)

Nosturin tukijalan laskentatapaukset mitoitettiin taulukon 4.4 seitsemällä mitoitustavalla eli Suomessa nykyisin käytettävillä mitoitustavoilla DA2 ja DA2* (ks. luku 2.3) sekä uusilla mitoitustapayhdistelmillä (a) VC1+M1, (b) VC3+M2, (c) VC1+M2, (d) VC1+RFA ja (e) VC1+RFA. Mitoitustapoja (a) ja (b) käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä. Mitoituksessa käytettiin kuormitusyhtälöä 6.10b tai 8.14b, ja pystykuormat tarkasteltiin vain epäedullisina tapauksina (V_{max}), koska vaakakuormia ei ole. Taulukossa 5.31 on esitetty yhteenveto maanvaraisen nosturin tukijalan osavarmuusluvuista eri mitoitustavoilla.

EN 1990 2016)							
Osavarmuus- luku	DA2, DA2*	Osavar- muusluku	(a) VC1 +M1	(b) VC3 +M2	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA
Yq	1,5	γα	1,5	1,3	1,5	1,5	1,11
		Ύε	-	-	-	-	1,35
Υ φ'	1,0	Υ φ'	1,0	1,25	1,25	-	-
Ycu	1,0	Ycu	1,0	1,4	1,4	-	-
Y R,v	1,55	Yrn	-	-	-	1,4	1,4
Y R,h	1,1	γrt	-	-	-	1,1	1,1

Taulukko 5.31. Osavarmuusluvut nosturin tukijalan laskentatapauksille eri mitoitustavoilla.Nykyinen GEO (YM NAUusi GEO (EN 1990 2023, liite A.1.7)

Mitoitus tehtiin laskemalla suurin mahdollinen keskeinen muuttuva ominaispystykuorma $Q_{V,k}$ kolmella eri täyttökerrospaksuuden D_1 ja tukijalan leveyden *B* yhdistelmällä. Kaikki mitoitukset tehdään kahdella eri saven lujuudella, $c_{u,k} = 10$ kPa ja $c_{u,k} = 20$ kPa. Laskentatapauksia oli yhteensä kuusi. Laskentatapauksissa maksimoitiin ominaispystykuorma $Q_{V,k}$ iterointitarkkuudella 1 kN niin, että toteutuu kantokestävyysehto (2.31).

Tuloksissa on vertailtu pystydiagrammein ominaispystykuormaa $Q_{V,k}$ eri mitoitustapojen välillä jokaisella laskentatapauksella. Lisäksi on taulukoitu jokaisella laskentatapauksella jokaisen mitoitustavan tuottamat tärkeimmät tulosparametrit: ominaispystykuorma $Q_{V,k}$, kuorman $Q_{V,k}$ ja mitoitustavan DA2* kuorman $Q_{V,k,DA2*}$ suhde $Q_{V,k}/Q_{V,k,DA2*}$, kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{KK} , kantokestävyyden mitoitusarvo $R_{Nu,d}$, ylemmän kerroksen kantokestävyyden mitoitusarvo R_{Nt} ja pystykuorman mitoitusarvo N_d .

Alaluvussa 5.3.1 esitetään tulokset nosturin tukijalan kahdesta laskentatapauksesta, jossa tukijalan pohja on pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on pieni (D_1 = 1,0 m). Alaluvussa 5.3.2 esitetään tulokset nosturin tukijalan kahdesta laskentatapauksesta, sesta, jossa tukijalan pohja on suuri (2,0 m x 2,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suuri

 $(D_1 = 2,0 \text{ m})$. Alaluvussa 5.3.3 esitetään tulokset nosturin tukijalan kahdesta laskentatapauksesta, jossa tukijalan pohja on pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suuri ($D_1 = 2,0 \text{ m}$). Alaluvussa 5.2.4 esitetään yhteenveto maanvaraisen nosturin tukijalan kuuden laskentatapauksen tuloksista sanallisesti. Lisäksi yhteenvedossa vertaillaan laskentatapauskohtaisesti mm. edullisinta ja epäedullisinta mitoitustapaa ja ominaispystykuorman $Q_{V,k}$ vaihteluväliä sekä verrataan mitoitustapojen suhteellista eroa mitoitustapaan DA2*.

5.3.1 Pieni tukijalan pohja ja pieni täyttökerros

Nosturin tukijalan kaksi laskentatapausta, joissa tukijalan pohja on pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on pieni ($D_1 = 1,0$ m) on esitetty luvussa 4.4.2 ja kuvassa 4.12. Ensimmäisessä näistä saven lujuus on $c_{u,k} = 10$ kPa ja toisessa $c_{u,k} = 20$ kPa. Laskentatapauksien eri mitoitustavoilla mitoitettu maksimipystykuorma $Q_{V,k}$ on esitetty pystydiagrammeina kuvassa 5.14. Mitoitustapoja (*a*) ja (*b*) käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.





Taulukossa 5.32 esitetään tulosparametrit laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k} = 10$ kPa. Taulukossa 5.33 esitetään tulosparametrit laskentatapauksesta, jossasaven lujuus on $c_{u,k} = 20$ kPa. Tulosparametrit ovat: ominaispystykuorma $Q_{V,k}$, kuorman $Q_{V,k}$ ja mitoitustavan DA2* kuorman $Q_{V,k,DA2*}$ suhde $Q_{V,k}/Q_{V,k,DA2*}$, kaavan (3.65) mukainen kantokestävyyden mitoitusarvo $R_{Nu,d}$, kaavan (3.66) mukainen ylemmän kerroksen kantokestävyyden mitoitusarvo $R_{Nt,d}$, kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{KK} (arvoista $R_{Nu,d}$ ja $R_{Nt,d}$ pienemmän mukaan) ja pystykuorman mitoitusarvo N_d . Taulukoissa on merkitty keltaisella määräävä kantokestävyys.

						<i>a</i> .	
Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4
			+W11'	+W2'	+11/2	+KFA	+KFA
<i>Q_{V,k}</i> [kN]	59	59	91	72	62	65	65
Q _{V,k} / Q _{V,k,DA2*} [%]	100 %	100 %	154 %	122 %	105 %	110 %	110 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1 ²	1,00	1,00	1,01	1,00	1,01	1,01	1,01
R _{Nu,d} [kN]	89	89	137	94	94	98	98
R _{Nt,d} [kN]	335	335	519	201	201	371	371
N _d [kN]	89	89	137	94	93	98	98
¹ Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.							

Taulukko 5.32. Nosturin tukijalan tulokset laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k}$ = 10 *kPa, tukijalan pohja on pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on pieni (D*₄ = 1 0 *m) Määräävä kantokestäyyys on merkitty keltaisella*

²Kantokestävyyksistä *R_{Nu,d} ja R_{Nt,d} pienemmän mukaan.*

Taulukko 5.33. Nosturin tukijalan tulokset laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k}$ = 20 *kPa, tukijalan pohja on pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on pieni (D*₁ = 1.0 *m). Määräävä kantokestävyys on merkitty keltaisella.*

$(D_1 - 1, 0, 11)$. Maaraava kantokestavyys on merkity keitaisena.						а.	
Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4
			+M11	+M21	+M2	+RFA	+RFA
Q _{V,k} [kN]	94	94	145	123	107	104	104
Q_{V,k}/Q_{V,k,DA2*} [%]	100 %	100 %	154 %	131 %	114 %	111 %	111 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1 ²	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00
R _{Nu,d} [kN]	141	141	219	161	161	156	156
R _{Nt,d} [kN]	335	335	519	201	201	371	371
N _d [kN]	141	141	218	160	161	156	156
¹ Mitoitustavoista (a) ia (b) epäedullisempi on määräävä							

²Kantokestävyyksistä *R_{Nu,d} ja R_{Nt,d} pienemmän mukaan*.

Kummassakin laskentatapauksessa määräävä kantokestävyys oli kaikilla mitoitustavoilla kaavan (3.65) mukainen kantokestävyyden mitoitusarvo $R_{Nu,d}$ eli kyseessä oli lävistysmurtuman rajatila (kuva 3.8a). Kummassakin laskentatapauksessa suurimman pystykuorman $Q_{V,k}$ tuotti mitoitustapojen (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmä. Kummassakin laskentatapauksessa pienimmän pystykuorman $Q_{V,k}$ tuottivat mitoitustavat DA2 ja DA2*. Heikomman ($c_{u,k} = 10$ kPa) ja vahvemman ($c_{u,k} = 20$ kPa) saven tapauksissa maksimipystykuorma $Q_{V,k}$ oli mitoitustapojen (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmällä 22 % ja 27 % suurempi, mitoitustavoilla (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA 10 % ja 11 % suurempi ja mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 5 % ja 14 % suurempi kuin mitoitustavoilla DA2 ja DA2*, tässä järjestyksessä.

Mitoitustavat (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 olivat edullisimmat mitoitustavat, koska mitoitustavalla (*a*) VC1+M1 lujuuden ja kestävyyden osavarmuusluvut ovat arvoltaan 1,0 ja mitoitustavalla (*b*) VC3+M2 kohdistaa kuormaosavarmuusluvut ovat pienemmät kuin muilla mitoitustavoilla. Laskentatapauksissa ei vaikuttanut kohdistettiinko osavarmuusluvut kuormaan (DA2, VC1, VC3) vai kuorman vaikutukseen (DA2*, VC4), koska kuormat vaikuttaneet kestävyyteen, koska vaakakuormia ei ollut. Koska pysyviä kuormia ei ollut, epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskertoimen ξ puuttuminen mitoitustavalla VC4 ei vaikuttanut vertailuun.

Laskentatapauksissa vaikutti vain vähän, kohdistettiinko osavarmuusluvut maan lujuuteen vai kestävyyteen. Tämä ero näkyy vertailtaessa mitoitustapoja (*c*) VC1+M2 ja (*d*) VC1+RFA. Heikomman saven ($c_{u,k} = 10$ kPa) tapauksessa (*c*) VC1+M2 tuotti pienemmän maksimipystykuorman $Q_{V,k}$ kuin (*d*) VC1+RFA, koska suurempi osa kestävyydestä aiheutui täyttökerroksesta, joka on avoimessa tilassa, ja pienempi osa savesta, joka on suljetussa tilassa. Avoimen tilan kantokestävyys on epälineaarisempi lujuuden suhteen kuin suljetun tilan. Vahvemman saven ($c_{u,k} = 20$ kPa) tapauksessa vastaavasti toisin päin.

Mitoitustavat (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA tuottivat suuremmat maksimipystykuormat $Q_{V,k}$ kuin mitoitustavat DA2 ja DA2*, koska ensimmäisillä on pienempi kantokestävyyden osavarmuusluku.

5.3.2 Suuri tukijalan pohja ja suuri täyttökerros

Nosturin tukijalan kaksi laskentatapausta, joissa tukijalan pohja on suuri (2,0 m x 2,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suuri ($D_1 = 2,0$ m) on esitetty luvussa 4.4.2 ja kuvassa 4.13. Ensimmäisessä näistä saven lujuus on $c_{u,k} = 10$ kPa ja toisessa $c_{u,k} = 20$ kPa. Laskentatapauksien eri mitoitustavoilla mitoitettu maksimipystykuorma $Q_{V,k}$ on esitetty pystydiagrammeina kuvassa 5.15. Mitoitustapoja (*a*) ja (*b*) käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.





Taulukossa 5.34 esitetään tulosparametrit laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k}$ = 10 kPa. Taulukossa 5.35 esitetään tulosparametrit laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k}$ = 20 kPa. Tulosparametrit ovat samat kuin luvussa 5.3.1.

Taulukko 5.34. Nosturin tukijalan tulokset laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k}$ = 10
kPa, tukijalan pohja on suuri (2,0 m x 2,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suur
(D ₁ = 2,0 m). Määräävä kantokestävyys on merkitty keltaisella.

(= /								
Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	
Q _{V,k} [kN]	332	332	514	380	329	367	367	
Q _{V,k} / Q _{V,k,DA2*} [%]	100 %	100 %	155 %	114 %	99 %	111 %	111 %	
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1 ²	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
R _{Nu,d} [kN]	498	498	772	495	495	552	552	
R _{Nt,d} [kN]	2678	2678	4151	1609	1609	2965	2965	
N _d [kN]	498	498	771	494	494	551	551	
¹ Mitoitustavoista (a)	ja (b) epäe	edullisempi	on määrää	ävä.				

²Kantokestävyyksistä $R_{Nu,d}$ ja $R_{Nt,d}$ pienemmän mukaan.

Taulukko 5.35.	Nosturin tukijalan tulokset laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k} = 20$
	kPa, tukijalan pohja on suuri (2,0 m x 2,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suuri
	$(D_{4} = 2.0 \text{ m})$ Määräävä kantokestävyys on merkitty keltaisella

$(D_1 - 2, 0, m)$. Widaraava karitokestavyys on merkitty keitaisella.							
Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1	(b) VC3	(c) VC1	(d) VC1	(e) VC4
			`+́M1¹	` + M2¹	`+́M2	+RFA	+RFA
Q _{V,k} [kN]	472	472	732	578	501	522	522
Q_{V,k}/Q_{V,k,DA2*} [%]	100 %	100 %	155 %	122 %	106 %	111 %	111 %
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1 ²	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
R _{Nu,d} [kN]	709	709	1098	752	752	784	784
R _{Nt,d} [kN]	2678	2678	4151	1609	1609	2965	2965
N _d [kN]	708	708	1098	751	752	783	783

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä. ²Kantokestävyyksistä $R_{Nu,d}$ ja $R_{Nt,d}$ pienemmän mukaan.

Kuten oli edellisen alaluvun 5.3.1 tapauksissa, määräävä kantokestävyys oli kaikilla mitoitustavoilla kaavan (3.65) mukainen kantokestävyyden mitoitusarvo $R_{Nu,d}$ eli kyseessä oli lävistysmurtuman rajatila (kuva 3.8a). Kummassakin laskentatapauksessa suurimman pystykuorman $Q_{V,k}$ tuotti mitoitustapojen (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmä. Tämä johtui samasta syystä kuin edellisen alaluvun 5.3.1 tapauksissa.

Toisin kuin edellisen alaluvun 5.3.1 tapauksissa osavarmuuslukujen kohdistaminen maan lujuuteen aiheutti selvästi pienemmän pystykuorman $Q_{V,k}$ kuin osavarmuuslukujen kohdistaminen kestävyyteen. Tämä ero näkyy vertailtaessa mitoitustapoja (*c*) VC1+M2 ja (*d*) VC1+RFA. Tämä johtuu siitä, että suuremmalla täyttökerroksen paksuudella D_1 lujuuden (kitkakulma φ ') vaikutus kestävyyteen on suurempi, koska suurempi osa kestävyydestä aiheutuu täyttökerroksesta, joka on avoimessa tilassa, ja pienempi osa savesta, joka on suljetussa tilassa. Avoimen tilan kantokestävyys on epälineaarisempi lujuuden suhteen kuin suljetun tilan kantokestävyys.

Heikomman ($c_{u,k}$ = 10 kPa) saven tapauksessa pienimmän pystykuorman $Q_{V,k}$ tuotti mitoitustapa (*c*) VC1+M2 ja vahvemman ($c_{u,k}$ = 20 kPa) saven tapauksessa mitoitustavat DA2 ja DA2*. Tämä johtui siitä, että heikomman ($c_{u,k}$ = 10 kPa) saven tapauksessa suurempi osa kestävyydestä aiheutui täyttökerroksesta, joka on avoimessa tilassa, ja pienempi osa savesta, joka on suljetussa tilassa.

Kuten oli edellisen alaluvun 5.3.1 tapauksissa, laskentatapauksissa ei vaikuttanut kohdistettiinko osavarmuusluvut kuormaan (DA2, VC1, VC3) vai kuorman vaikutukseen (DA2*, VC4) eikä epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskertoimen ξ puuttuminen mitoitustavalla VC4 vaikuttanut vertailuun. Mitoitustavat (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA tuottivat suuremmat maksimipystykuormat $Q_{V,k}$ kuin mitoitustavat DA2 ja DA2*, koska ensimmäisillä on pienempi kantokestävyyden osavarmuusluku.

Heikomman ($c_{u,k}$ = 10 kPa) ja vahvemman ($c_{u,k}$ = 20 kPa) saven tapauksissa maksimipystykuorma $Q_{V,k}$ oli mitoitustapojen (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmällä 14 % ja 22 % suurempi, mitoitustavoilla (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA 11 % ja 11 % suurempi ja mitoitustavalla (*c*) VC1+M2 1 % pienempi ja 6 % suurempi kuin mitoitustavoilla DA2 ja DA2*, tässä järjestyksessä.

5.3.3 Pieni tukijalan pohja ja suuri täyttökerros

Nosturin tukijalan kaksi laskentatapausta, joissa tukijalan pohja on pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suuri (D_1 = 2,0 m) on esitetty luvussa 4.4.2 ja kuvassa

4.14. Ensimmäisessä näistä saven lujuus on $c_{u,k}$ = 10 kPa ja toisessa $c_{u,k}$ = 20 kPa. Laskentatapauksien eri mitoitustavoilla mitoitettu maksimipystykuorma $Q_{V,k}$ on esitetty pystydiagrammeina kuvassa 5.15. Mitoitustapoja *(a)* ja *(b)* käytetään aina yhdessä ja niistä epäedullisempi on määräävä.



Kuva 5.15. Nosturin tukijalan maksimipystykuorma $Q_{V,k}$ kahdella eri lujuuden savella, $c_{u,k} = 10 \ kPa$ ja $c_{u,k} = 20 \ kPa$. Pieni tukijalan pohja (1,0 m x 1,0 m) ja pieni täyttökerroksen paksuus ($D_1 = 2,0 \ m$). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Taulukossa 5.36 esitetään tulosparametrit laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k} = 10$ kPa. Taulukossa 5.37 esitetään tulosparametrit laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k} = 20$ kPa. Tulosparametrit ovat: ominaispystykuorma $Q_{V,k}$, kuorman $Q_{V,k}$ ja mitoitustavan DA2* kuorman $Q_{V,k,DA2*}$ suhde $Q_{V,k}/Q_{V,k,DA2*}$, kaavan (3.65) mukainen kantokestävyyden mitoitusarvo $R_{Nu,d}$, kaavan (3.66) mukainen ylemmän kerroksen kantokestävyyden mitoitusarvo $R_{Nt,d}$, kantokestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{KK} (arvoista $R_{Nu,d}$, $R_{Nt,d}$ ja $R_{N,pk,d}$ määräävän mukaan) ja pystykuorman mitoitusarvo N_d . Lisäksi taulukoissa on kantokestävyyden mitoitustavoilla, joilla päti $R_{Nt,d} < R_{Nu,d}$ eli lävistysmurtoa ei tapahtunut ja joilla murtovyöhykkeen syvyydelle z_e päti $z_e = 2,13 \cdot B = 2,13$ m > $D_1 = 2,0$ m (ks. luku 4.4.3). Taulukoissa on merkitty keltaisella määräävä kantokestävyys.

Parametri	DA2	DA2^	(a) VC1	(b) VC3	(C) VC1	(d) VC1	(e) VC4	
			+M1'	+M2'	+M2	+RFA	+RFA	
<i>Q_{V,k}</i> [kN]	156	156	242	147	127	173	173	
Q _{V,k} / Q _{V,k,DA2*} [%]	100 %	100 %	155 %	94 %	81 %	111 %	111 %	
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1 ²	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00	
R _{Nu,d} [kN]	235	235	364	244	244	260	260	
R _{Nt,d} [kN]	335	335	519	201	201	371	371	
N _d [kN]	234	234	363	191	191	260	260	
R _{N,pk,d} [kN]	-	-	-	192	192	-	-	

Taulukko 5.36. Nosturin tukijalan tulokset laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k} = 10$ kPa, tukijalan pohja on pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suuri ($D_4 = 2.0$ m) Määräävä kantokestävvys on merkitty keltaisella

¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

²Kantokestävyyksistä *R_{Nu,d}*, *R_{Nt,d}* ja *R_{N,pk,d}* määräävän mukaan.

Taulukko 5.37. Nosturin tukijalan tulokset laskentatapauksesta, jossa saven lujuus on $c_{u,k}$ = 20 *kPa, tukijalan pohja on pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suuri (D*₁ = 2.0 *m). Määräävä kantokestävvvs on merkitty keltaisella.*

(D)								
Parametri	DA2	DA2*	(a) VC1 +M1 ¹	(b) VC3 +M2 ¹	(c) VC1 +M2	(d) VC1 +RFA	(e) VC4 +RFA	
<i>Q_{V,k}</i> [kN]	217	217,0	336	149	129	240	240	
Q _{V,k} /Q _{V,k,DA2*} [%]	100 %	100 %	155 %	69 %	59 %	111 %	111 %	
<i>ODF_{KK}</i> ≥ 1 ²	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
R _{Nu,d} [kN]	326	326	505	378	378	361	361	
R _{Nt,d} [kN]	335	335	519	201	201	371	371	
N _d [kN]	326	326	504	194	194	360	360	
<i>R_{N,pk,d}</i> [kN]	-	-	-	194	194	-	-	
¹ Mitoitustavoista (a)	ia (h) enäe	dullisemni	on määrää	ävä				

²Kantokestävyyksistä $R_{Nu,d}$, $R_{Nt,d}$ ja $R_{N,pk,d}$ määräävän mukaan.

Kummassakin laskentatapauksessa määräävä kantokestävyys oli mitoitustavoilla (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 kantokestävyyden mitoitusarvo painotetulla keskiarvolla $R_{N,pk,d}$ ja muilla mitoitustavoilla kaavan (3.65) mukainen kantokestävyyden mitoitusarvo $R_{Nu,d}$. Tämä johtui siitä, että kaavan (3.66) mukainen täyttökerroksen kantokestävyys $R_{Nt,d}$ on maan lujuuden suhteen epälineaarisempi kuin kaavan (3.65) mukainen täyttökerroksen lävistyskestävyyden ja saven kantokestävyyden yhdistelmä $R_{Nu,d}$, koska täyttökerroksen lävistyskestävyyden ja saven kantokestävyys $R_{Nt,d}$ hyve ta koska täyttökerroksen kantokestävyys $R_{Nt,d}$ laski enemmän kuin muilla mitoitustavoilla (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 täyttökerroksen kantokestävyys $R_{Nt,d}$ laski enemmän kuin muilla mitoitustavoilla. Mitoitustapojen (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 mukaan laskettuna täyttökerros murtui siis Prandtlin teorian mukaisesti (kuva 3.8b) eikä lävistysmurtumana (kuva 3.8a). Mutta murtovyöhykkeen syvyys $z_e = 2,13$ m (ks. luku 4.4.3) oletetaan suuremmaksi kuin täyttökerroksen paksuus $D_1 = 2,0$ m, joten kantokestävyyden mitoitusarvo laskettiin painotetulla keskiarvolla $R_{N,pk,d}$ kaavan (4.101) mukaisesti. Ero mitoitusarvojen $R_{Nt,d}$ ja $R_{N,pk,d}$ on kuitenkin hyvin pieni eikä muuta johtopäätöksiä.

Tukijalan pienen pohjan takia kantokestävyys yksin täyttökerroksessa $R_{Nt,d}$ oli ylipäätään pieni, mutta suuren täyttökerrospaksuuden takia täyttökerroksen lävistyskestävyyden ja

saven kantokestävyyden yhdistelmä *R_{Nu,d}* oli kuitenkin suhteellisen suuri. Tämän takia näissä kahdessa laskentatapauksessa murtorajatila oli yksin täyttökerroksessa ylipäätään millään mitoitustavalla.

Kummassakin laskentatapauksessa suurimman pystykuorman $Q_{V,k}$ tuottivat mitoitustavat (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA. Mitoitustavalla (*a*) VC1+M1 olisi yksinään mitoittanut suurimman pystykuorman $Q_{V,k}$, mutta mitoitustavalla (*b*) VC3+M2 ylemmän kerroksen kantokestävyyden mitoitusarvo R_{Nt} oli niin pieni, että mitoitustapojen (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmän maksimipystykuorma $Q_{V,k}$ jäi pieneksi. Kummassakin laskentatapauksessa pienimmän maksimipystykuorman $Q_{V,k}$ tuotti mitoitustapa (*c*) VC1+M2.

Lukuun ottamatta mitoitustapojen (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 kantokestävyyttä, joilla määräävä kantokestävyys oli kantokestävyyden mitoitusarvo painotetulla keskiarvolla $R_{N,pk,d}$, tulokset määräytyivät samalla logiikalla kuin edellisten alalukujen 5.3.1 ja 5.3.2 tapaukset.

5.3.4 Yhteenveto nosturin tukijalan tuloksista

Nosturin tukijalan laskentatapauksissa taloudellisin mitoitustapa eli suurimman ominaispystykuorman $Q_{V,k}$ tuottava mitoitustapa oli yleensä mitoitustapojen (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmä mutta osassa tapauksista (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA. Yleensä epätaloudellisimmat mitoitustavat eli pienimmän ominaispystykuorman $Q_{V,k}$ tuottavat mitoitustavat olivat DA2, DA2* mutta osassa tapauksista (*c*) VC1+M2. Mitoitustapojen (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmästä mitoitustapa (*a*) VC1+M1 oli aina edullisempi, usein huomattavasti.

Määräävä kantokestävyys oli kaavan (3.65) mukainen kantokestävyyden mitoitusarvo $R_{Nu,d}$ kaikissa nosturin tukijalan laskentatapauksissa kaikilla mitoitustavoilla paitsi luvun 5.3.3 tapauksissa, joissa tukijalan pohja oli pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus oli suuri (D_1 = 2,0 m). Näissä tapauksissa mitoitustavoilla (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 kantokestävyys oli kaavan (4.101) mukainen painotettu keskiarvo $R_{N,pk,d}$ täyttökerroksen ja savikerroksen kantokestävyyksistä.

Taulukossa 5.38 on esitetty vertailu mitoitustavoista nosturin tukijalalla. Laskentatapauksen suurimman maksimipystykuorman $Q_{V,k}$ suhteellinen ero pienimpään maksimipystykuormaan $Q_{V,k}$ mitoitustapojen välillä eli $Q_{V,k}$:n vaihteluväli-% sai arvoja eri laskentatapauksissa välillä 16–86 %. Mitoitustapojen *(a)* VC1+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhdistelmä oli edullisin neljässä tapauksessa, koska ensimmäisen lujuuden ja kestävyyden osavarmuuslukujen arvot ovat 1,0 ja koska toinen kohdistaa pienemmän osavarmuusluvun kuormiin kuin muut mitoitustavat. Näistä kahdesta mitoitustavasta (b) VC3+M2 oli aina määräävä.

Mitoitustapojen eroihin ei vaikuttanut kohdistettiinko osavarmuusluvut kuormaan (DA2, VC1, VC3) vai kuorman vaikutukseen (DA2*, VC4), koska kuormat eivät vaikuttaneet kestävyyteen, koska vaakakuormia ei ollut. Koska pysyviä kuormia ei ollut, epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskertoimen ξ puuttuminen mitoitustavalla VC4 ei vaikuttanut vertailuun.

Pienen täyttökerrospaksuuden tapauksilla (luku 5.3.1) oli vain vähän eroa sillä, kohdistetaanko osavarmuusluvut maan lujuuteen vai kestävyyteen. Erot mitoitustapojen välillä johtuivat näissä tapauksissa vain kuormien osavarmuusluvuista. Luonnollisesti mitoitustavat (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA olivat kuitenkin edullisempia kuin mitoitustavat DA2 ja DA2* pienemmän kantokestävyyden osavarmuusluvun takia.

Kun täyttökerrospaksuus D_1 on suurempi, lujuuden vaikutus kestävyyteen on epälineaarisempi täyttökerroksen avoimen tilan takia. Tämän takia mitoitustapojen DA2, DA2*, (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA ero mitoitustapoihin (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 kaventui suuren täyttökerrospaksuuden tapauksissa (luku 5.3.2) verrattuna pienen täyttökerrospaksuuden tapauksiin (luku 5.3.1).

Luvun 5.3.3 tapauksissa, joissa tukijalan pohja oli pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suuri (D_1 = 2,0 m), tämä ero kääntyi selvästi toisin päin eli (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 olivat epäedullisempia kuin DA2, DA2*, (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA. Tämä johtui siitä, että mitoitustavoilla (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 kantokestävyys yksin täyttökerroksessa $R_{Nt,d}$ (kaava (3.66)) oli pienempi kuin täyttökerroksen lävistyskestävyyden ja saven kantokestävyyden yhdistelmä $R_{Nu,d}$ (kaava (3.65)) ja murtuminen tapahtuu yksin täyttökerroksessa. Tarkempi selitys näistä tuloksista on luvussa 5.3.3 ja lävistysmurron teoriasta luvussa 3.6.

		J: (1)					
Laskentata- paukset	Pieni tukijal pieni täyttöl	an pohja ja kerros	Suuri tukijal suuri täyttöl	an pohja ja kerros	Pieni tukijalan pohja ja suuri täyttökerros		
	<i>с_{и,к}</i> = 10 kPa	<i>c_{u,k}</i> = 20 kPa	<i>c_{u,k}</i> = 10 kPa	<i>c_{u,k}</i> = 20 kPa	<i>c_{u,k}</i> = 10 kPa	с _{и,к} = 20 kPa	
Edullisim- mat mitoi- tustavat ¹	VC1+M1, VC3+M2,	VC1+M1, VC3+M2	VC1+M1, VC3+M2	VC1+M1, VC3+M2	VC1+RFA, VC4+RFA	VC1+RFA, VC4+RFA	
Epäedulli- simmat mi- toitustavat ²	DA2, DA2*	DA2, DA2*	VC1+M2	DA2, DA2*	VC1+M2	VC1+M2	
Q _{V,k} :n vaih- teluväli-% ³	22 %	31 %	16 %	22 %	36 %	86 %	

 Taulukko 5.38. Mitoitustapojen vertailutaulukko nosturin tukijalan laskentatapauksista. Mitoitustavat (a) VC1+M1 ja (b) VC3+M2 tarkastellaan yhdessä.

¹ Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen suurin maksimipystykuorma Q_{V, k}

² Mitoitustavat, joilla on laskentatapauksen pienin maksimipystykuorma Q_{V,k}.

³ Laskentatapauksen suurimman maksimipystykuorman $Q_{V, k}$ suhteellinen ero pienimpään maksimipystykuormaan $Q_{V, k}$ mitoitustapojen välillä.

Nykyisin Suomessa käytetään usein mitoitustapaa DA2* nosturin tukijalan GEO-murtorajatilojen mitoituksessa. Vertailua varten on laskettu jokaisen (n = 6) laskentatapauksen *i* jokaiselle mitoitustavalle *j* ominaispystykuorman $Q_{V,k,i,j}$ ja mitoitustavan DA2* ominaispystykuorman $Q_{V,k,i,DA2*}$ avulla keskimääräinen suhteellinen ero \bar{v}_j mitoitustapaan DA2* kaavalla

$$\bar{v}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{V,k,i,j} - Q_{V,k,i,DA2^*}}{Q_{V,k,i,DA2^*}}.$$
(5.4)

Kuvassa 5.16 on esitetty nosturin tukijalan laskentatapauksien ominaispystykuorman $Q_{V,k}$ keskimääräinen suhteellinen ero \bar{v} eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2*. Huomataan, että tämän työn laskentatapauksissa mitoitustapojen (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmä tuotti keskimäärin 9 % ja mitoitustavat (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA 11 % suuremman maksimipystykuorman $Q_{V,k}$ nosturin tukijalalle kuin mitoitustavat DA2 ja DA2*. Mitoitustapa (*c*) VC1+M2 tuotti keskimäärin 6 % pienemmän maksimipystykuorman $Q_{V,k}$ kuin mitoitustavat DA2 ja DA2*. On huomattava, että kuvan 5.16 vertailussa mitoitustavan edullisuus on eri suuntaan kuin neliöanturan kuvan 5.4 ja kulmatukimuurin kuvan 5.11 vertailuissa.



Kuva 5.16. Maksimipystykuorman Q_{V,k} kaikkien laskentatapauksien keskimääräinen suhteellinen ero ⊽ eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2*. ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

5.4 Neliöantura kalliolla (EQU)

Kallionvaraisen neliöanturan laskentatapaus mitoitettiin taulukon 4.5 mitoitustavoilla eli staattisen tasapainon (EQU) osalta Suomessa nykyisin käytettävällä mitoitustavalla (ks. luku 2.5.1) ja uudella mitoitustavalla VC2, josta on kaksi osavarmuuslukusarjaa, VC2(a)

ja VC2(b), joista määräävä on epäedullisempi yhdistelmä. Lisäksi tehtiin tarkistus liukumiskestävyyden (GEO) osalta Suomessa nykyisin käytettävällä mitoitustavalla DA2* ja tätä lähellä olevalla uudella mitoitustavalla VC4+RFA. EQU-mitoituksessa käytettiin kuormitusyhtälöä 6.10 tai 8.12 ja liukumiskestävyyden mitoituksessa kuormitusyhtälöä 6.10b tai 8.14b (vaakakuorma muuttuva, ks. luku 4.5.1). Pystykuormat tarkasteltiin vain edullisina tapauksina (V_{min}), koska molemmissa murtorajatiloissa pystykuormat ovat edullisia (ks. luku 4.5.1). Taulukossa 5.39 on esitetty yhteenveto kallionvaraisen neliöanturan laskentatapauksen osavarmuusluvuista eri mitoitustavoilla.

	tavoill	la.					
Nykyine (YM NA 2016)	en EQU EN 1990	VC2 (EN 1990 2023, liite A.1.7)					
Sym- boli		Symboli	VC2(a)	VC2(b)			
Y G,inf	0,90	Υ G,fav	1,0	1,0			
γα	1,5	γα	1,5	1,5			

 Taulukko 5.39. Osavarmuusluvut kallionvaraisen neliöanturan laskentatapaukselle eri mitoitustavoilla.

Kallionvaraisen neliöanturan laskentatapauksessa leveys *B* minimoitiin iterointitarkkuudella 0,1 m niin, että toteutuu staattisen tasapainon ehto (2.41) ja liukumiskestävyysehto (2.32). Staattisen tasapainon ehdon (2.41) perusteella laskettiin staattisen tasapainon ylimitoituskerroin kaavalla

$$ODF_{EOU} = E_{stb,d} / E_{dst,d} \ge 1.$$
(5.5)

Liukumiskestävyysehdon (2.32) perusteella laskettiin liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin kaavalla (5.2).

Laskentatapaus kallionvaraisella neliöanturalla on esitetty luvussa 4.5 ja kuvassa 4.15. Laskentatapauksen mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla on esitetty pystydiagrammeina kuvassa 5.17. Kuten todettiin luvussa 4.5.2, tässä laskentatapauksessa osavarmuuslukusarjoilla VC2(a) ja VC2(b) ei ole mitään eroa, koska mitoitusarvot $E_{dst,d}$ ja $E_{stb,d}$ ovat molemmilla mitoitustavoilla identtiset. Tästä syystä laskennassa käsiteltiin vain toista osavarmuuslukusarjaa.





Taulukossa 5.40 on esitetty laskentatapauksen tulosparametrit: leveys *B*, staattisen tasapainon ylimitoituskerroin ODF_{EQU} , liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{LK} , vakauttavan momentin mitoitusarvo $E_{stb,d}$, kaatavan momentin mitoitusarvo $E_{dst,d}$, pystykuorman mitoitusarvo N_d ja vaakakuorman mitoitusarvo T_d . Uudella mitoitustavalla VC2 anturaleveys *B* on 5 % pienempi kuin nykyisellä EQU-mitoitustavalla. Tämä johtui siitä, että uudella mitoitustavalla VC2 pysyvän edullisen kuorman osavarmuusluku $\gamma_{G,fav}$ = 1,0 oli suurempi kuin nykyisellä EQU-mitoitustavalla $\gamma_{G,inf}$ = 0,9. Molemmilla mitoitustavoilla määräävä ehto oli staattinen tasapaino eikä liukumiskestävyys, koska anturaleveys *B* oli pieni suhteessa vaakakuorman momenttivarteen *h*.

Parametri	Nyk. EQU ja DA2* ¹	VC2 ja VC4+RFA ²
<i>B</i> [m]	1,9	1,8
<i>ODF_{EQU}</i> ≥ 1	1,01	1,06
<i>ODFLK</i> ≥ 1	3,69	5,50
E _{stb,d} [kNm]	912	956
<i>E_{dst,d}</i> [kNm]	900	900
N _d [kN]	960	1062
<i>T_d</i> [kN]	225	225
¹ Staattinen tasa EQU-mitoitustav kistettu mitoitust ² Staattinen tasa Liukumiskestävy	ipaino Suomen i valla. Liukumiske avalla DA2*. ipaino mitoitusta vys tarkistettu mi	hykyisellä estävyys tar- ivalla VC2. itoitustavalla

VC4+RFA

Taulukko 5.40. Kallionvaraisen neliöanturan laskentatapauksen tulokset. Määräävä parametri on merkitty keltaisella.

5.5 Kulmatukimuuri kalliolla (EQU)

Kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentatapaukset mitoitettiin taulukon 4.6 mitoitustavoilla. Staattinen tasapaino (EQU) mitoitettiin Suomessa nykyisin käytettävällä mitoitustavalla (ks. luku 2.5.1) mallikertoimella γ_{MK} = 1,20 ja ilman mallikerrointa. Lisäksi staattinen tasapaino (EQU) mitoitettiin uudella mitoitustavalla VC2 kahdella eri maan lujuuden osavarmuuslukusarjalla M1 ja M2 (taulukko 2.7). Mitoitustavalla VC2 on kuormille kaksi osavarmuuslukusarjaa, VC2(a) ja VC2(b). Sarjoista epäedullisempi yhdistelmä on määräävä.

Liukumiskestävyyden (GEO) tarkistus tehtiin Suomessa nykyisin käytettävällä mitoitustavalla DA2* ja tätä lähellä olevalla uudella mitoitustavalla VC4+RFA. Taulukossa 5.41 on esitetty yhteenveto kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksien osavarmuusluvuista eri mitoitustavoilla.

Nykyinen NA EN 199	EQU (LVM 0 2015)	VC2 (EN 1990 20)	23, liite A.2.8	3)
Symboli	Arvo	Symboli	VC2(a)	VC2(b)
Y G,sup	1,15	Υ _G	1,35	1,0
γ _{G,inf}	0,90	$\mathbf{Y}_{G, fav}$	1,0	1,0
γ _Q (tie)	1,35	γ _Q (tie)	1,35	1,35
γ _Q (raide)	1,45	γ _Q (raide)	1,45	1,45
ү мк	1,20	-	-	-
Υ φ'	1,25	Υ φ'	M1	M2
			1,0	1,25

 Taulukko 5.41. Osavarmuusluvut kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksille eri mitoitustavoilla.

EQU-mitoituksessa käytettiin kuormitusyhtälöä 6.10 tai 8.12 ja liukumiskestävyyden mitoituksessa kuormitusyhtälöparia 6.10a ja 6.10b tai 8.14a ja 8.14b (ks. luku 4.6.1). Pystykuormat tarkasteltiin vain edullisina tapauksina (V_{min}), koska molemmissa murtorajatiloissa pystykuormat ovat edullisia (ks. luku 4.6.1). Kallionvaraisen kulmatukimuurin laskentatapauksissa leveys *B* minimoitiin iterointitarkkuudella 0,1 m niin, että toteutuu staattisen tasapainon ehto (2.41) ja liukumiskestävyysehto (2.32). Staattisen tasapainon ehdon (2.41) perusteella laskettiin staattisen tasapainon ylimitoituskerroin kaavalla (5.5). Liukumiskestävyysehdon (2.32) perusteella laskettiin liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin kaavalla (5.2).

Mitoitus tehtiin kolmella eri liikennekuormalla, rautatieliikennekuormalla, maantieliikennekuormalla ja ilman liikennekuormaa tuettavan maan päällä. Laskentatapauksia oli yhteensä kolme. Laskentatapaukset kallionvaraisella kulmatukimuurilla on esitetty luvussa 4.6 ja kuvassa 4.16. Laskentatapauksen mitoitetut leveydet *B* eri mitoitustavoilla on esitetty pystydiagrammeina kuvassa 5.18. Taulukossa 5.42 on esitetty rautatieliikennekuorman laskentatapauksen, taulukossa 5.38 maantieliikennekuorman laskentatapauksen ja taulukossa 5.43 ei liikennekuormaa -laskentatapauksen tulosparametrit: leveys *B*, staattisen tasapainon ylimitoituskerroin ODF_{EQU} , liukumiskestävyyden ylimitoituskerroin ODF_{LK} , vakauttavan momentin mitoitusarvo $E_{stb,d}$, kaatavan momentin mitoitusarvo $E_{dst,d}$, pystykuorman mitoitusarvo N_d ja vaa-kakuorman mitoitusarvo T_d . Parametrien $E_{stb,d}$, $E_{dst,d}$, N_d ja T_d yksiköt ovat per yksi tukimuurimetri.





Parametri	Nyk. EQU + mk ja	Nyk. EQU ja DA2* ²	VC2+M2 ja VC4+RFA ³		VC2+ VC4+	M1 ja RFA⁴
	DA2*1		VC2(a)	VC2(b)	VC2(a)	VC2(b)
<i>B</i> [m]	3,3	3,2	3	,1	2	,8
<i>ODF_{EQU}</i> ≥ 1	1,02	1,00	1,01	1,07	1,01	1,07
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,15	1,15 1,23		1,:	23	
E _{stb,d} [kN]	317	298	311	311	254	254
<i>E_{dst,d}</i> [kN]	317	297	308	289	254	236
<i>N</i> _d [kN/m]	196	191	205	205	186	186
<i>T_d</i> [kN(m]	196	185	194	177	159	145

Taulukko 5.42. Kallionvaraisen kulmatukimuurin rautatieliikennekuorman laskentatapauksen tulokset. Määräävä parametri on merkitty keltaisella.

¹ Staattinen tasapaino Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla ja mallikertoimella γ_{MK} = 1,20. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla DA2*.

² Staattinen tasapaino Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla ja ilman mallikerrointa. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla DA2*.

³ Staattinen tasapaino mitoitustavalla VC2 ja maan lujuuden osavarmuuslukusarjalla M2. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla VC4+RFA.

⁴ Staattinen tasapaino mitoitustavalla VC2 ja maan lujuuden osavarmuuslukusarjalla M1. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla VC4+RFA.

Parametri	Nyk. EQU + mk ja	Nyk. EQU ja DA2* ²	VC2+M2 ja VC4+RFA ³		VC2+ VC4+	M1 ja RFA⁴
	DA2*1		VC2(a)	VC2(b)	VC2(a)	VC2(b)
<i>B</i> [m]	2,2	2,1		2,1		1,9
<i>ODF_{EQU}</i> ≥ 1	1,04	1,04	1,06	1,23	1,06	1,24
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,53	1,53		1,54		1,54
E _{stb,d} [kN]	141	129	143	143	117	117
<i>E_{dst,d}</i> [kN]	141	124	135	116	117	95
<i>N_d</i> [kN/m]	133	127	141	141	128	128
<i>T_d</i> [kN(m]	103	92	101	84	83	69

Taulukko 5.43. Kallionvaraisen kulmatukimuurin maantieliikennekuorman laskentatapauksen tulokset. Määräävä parametri on merkitty keltaisella.

¹ Staattinen tasapaino Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla ja mallikertoimella γ_{MK} = 1,20. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla DA2*.

² Staattinen tasapaino Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla ja ilman mallikerrointa. Liukuvieleesti suote tasapaino Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla ja ilman mallikerrointa. Liukuvieleesti suote tasapaino Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla ja ilman mallikerrointa. Liuku-

miskestävyys tarkistettu mitoitustavalla DA2*. ³ Staattinen tasapaino mitoitustavalla VC2 ja maan lujuuden osavarmuuslukusarjalla M2. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla VC4+RFA.

⁴ Staattinen tasapaino mitoitustavalla VC2 ja maan lujuuden osavarmuuslukusarjalla M1. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla VC4+RFA.

Taulukko	5.39.	Kallionvaraisen	kulmatukimuurin	ei	liikennekuormaa	-laskentatapauksen	tulok-
		set. Määräävä p	arametri on merki	itty	keltaisella.		

Parametri	Nyk. EQU + mk ja	Nyk. EQU ja DA2* ²	VC2+ VC4+	M2 ja RFA ³	VC2+M1 ja VC4+RFA⁴		
	DA2*1		VC2(a)	VC2(b)	VC2(a)	VC2(b)	
<i>B</i> [m]	1,6	1,5		1,5		1,4	
<i>ODF_{EQU}</i> ≥ 1	1,02	1,07	1,02	1,37	1,08	1,46	
<i>ODFLK</i> ≥ 1	1,66	1,66	1,73		1,73		
E _{stb,d} [kN]	75	66	73	73	64	64	
<i>E_{dst,d}</i> [kN]	75	62	72	53	64	44	
<i>N_d</i> [kN/m]	98	92	102	102	96	96	
<i>T_d</i> [kN(m]	67	56	66	49	54	40	

¹ Staattinen tasapaino Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla ja mallikertoimella γ_{MK} = 1,20. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla DA2*.

² Staattinen tasapaino Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla ja ilman mallikerrointa. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla DA2*.

³ Staattinen tasapaino mitoitustavalla VC2 ja maan lujuuden osavarmuuslukusarjalla M2. Liu-

kumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla VC4+RFA.

⁴ Staattinen tasapaino mitoitustavalla VC2 ja maan lujuuden osavarmuuslukusarjalla M1. Liukumiskestävyys tarkistettu mitoitustavalla VC4+RFA.

Kaikissa kolmessa laskentatapauksessa määräävä ehto oli staattinen tasapaino eikä liukumiskestävyys, koska tukimuurileveys *B* oli pieni suhteessa vaakakuorman momenttivarteen *y*. Kuormaosavarmuuslukusarjoista VC2(a) ja VC2(b) oli VC2(a) määräävä kaikissa laskentatapauksissa, koska sillä on suurempi osavarmuusluku epäedullisille pysyville kuormille γ_{G} .

Mitoitustavalla VC2+M1 tukimuurileveys *B* oli 12–15 % pienempi, mitoitustavalla VC2+M2 5–6 % pienempi ja Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla ilman mallikerrointa 3–6 % pienempi kuin Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla mallikertoimella γ_{MK} = 1,20 eri laskentatapauksissa. Erot johtuivat lujuuden osavarmuusluvuista ja mallikertoimen käyttämisestä. Lisäksi uusien mitoitustapojen VC2+M1 ja VC2+M2 tukimuurileveys *B* oli

pienempi kuin Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla, koska uudella mitoitustavalla VC2 pysyvän edullisen kuorman osavarmuusluku $\gamma_{G,fav} = 1,0$ oli suurempi kuin nykyisellä EQU-mitoitustavalla $\gamma_{G,inf} = 0,9$. Toisaalta nykyisen EQU-mitoitustavalla tukimuurile-veyttä *B* pienensi se, että tällä on pienempi pysyvän epäedullisen kuorman osavarmuus-luku ($\gamma_{G,sup} = 1,15$) uudella mitoitustavalla ($\gamma_G = 1,35$).

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen yhteenveto, johtopäätökset ja jatkotutkimusten tarve. Alaluvussa 6.1 esitetään sanallisesti vertailu nykyisistä ja uusista GEO-mitoitustavoista kantokestävyydelle ja liukumiskestävyydelle ja johtopäätökset. Alaluvussa 6.2 esitetään yhteenveto GEO-murtorajatilan eli maanvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin sekä nosturin tukijalan laskentatapauksien tuloksista ja johtopäätökset. Alaluvussa 6.3 esitetään sanallisesti vertailu nykyisestä ja uudesta EQU-mitoitustavasta, yhteenveto tutkimuksen EQU-murtorajatilan laskentatapauksien tuloksista ja johtopäätökset.

6.1 GEO-murtorajatilan mitoitustavat

GEO-mitoitustapoja verrattiin maanvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin sekä nosturin tukijalan laskentatapauksissa. Maanvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin laskentatapauksissa verrattavat GEO-murtorajatilat olivat kantokestävyys ja liukumiskestävyys, joiden lisäksi reunaehtoina mitoituksessa olivat epäkeskisyysehdot. Nosturin tukijalan laskentatapauksissa verrattiin kantokestävyyden erityistyyppiä, lävistysmurtumaa. Uusien eurokoodien kantokestävyysehto (2.31) ja liukumiskestävyysehto (2.32) ovat vaakasuoralla perustuksen pohjalla samat kuin nykyisten eurokoodien kantokestävyysehto (2.11) ja liukumiskestävyysehto (2.12).

Antura- ja laattaperustusten kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden mitoittamiseen on uusissa eurokoodeissa 5 eri mitoitustapaa, (a) VC1+M1, (b) VC3+M2, (c) VC1+M2, (d) VC1+RFA ja (e) VC4+RFA, joista mitoitustapoja (a) ja (b) käytetään aina yhdessä valiten niistä epäedullisempi. Nosturin tukijalan kantokestävyyden mitoittamiseen käytettiin tässä työssä näitä antura- ja laattaperustusten mitoitustapoja (perustelu luvussa 4.4.1). Tukimuurin kantokestävyyden ja liukumiskestävyyden mitoittamiseen uudet mitoitustavat ovat samat kuin antura- ja laattaperustuksilla, paitsi mitoitustavan (a) VC1+M1 tilalla on mitoitustapa (a) VC4+M1 eli osavarmuusluvut kohdistetaan kuorman vaikutuksiin kuormien sijaan.

Mitoitustapojen *(a)* VC1+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhdistelmä vastaa nykyistä mitoitustapaa DA1, jota ei Suomessa käytetä. Mitoitustapa *(b)* VC3+M2 oli tutkituissa laskentatapauksissa määräävä mitoitustavoista *(a)* VC1+M1 ja *(b)* VC3+M2 yhtä tapausta 24:stä lukuun ottamatta. Mitoitustapa *(b)* VC3+M2 yksinään on geoteknisten kuormien osalta lähellä

nykyistä mitoitustapaa DA3, jota käytetään Suomessa penkereiden ja luiskien stabiliteettilaskennassa. Mitoitustapa *(c)* VC1+M2 ei vastaa suoraan mitään nykyistä mitoitustapaa, mutta se on lähellä nykyistä mitoitustapaa DA3 rakenteellisten kuormien osalta.

Mitoitustapa (*d*) VC1+RFA on lähellä Suomen nykyistä mitoitustapaa DA2 ja mitoitustapa (*e*) VC4+RFA Suomen nykyistä mitoitustapaa DA2*, tosin kantokestävyyden osavarmuusluku mitoitustavoilla (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA on γ_{RN} = 1,4 ja mitoitustavoilla DA2 ja DA2* $\gamma_{R,v}$ = 1,55. Lisäksi mitoitustavan (*d*) VC1+RFA kuormien osavarmuusluvut poikkeavat hieman DA2:n kansallisesti valituista osavarmuusluvuista Suomessa.

Uudet eurokoodit esittävät täsmällisemmin mitoitustavan *(e)* VC4+RFA varmuuden kohdentamisen muuttuviin kuormiin kuin nykyiset eurokoodit mitoitustavan DA2*. Mitoitustavalla VC4 kuorman vaikutuksien osavarmuusluku γ_E kohdistuu kaikkien kuormien vaikutuksiin ja muuttuviin kuormiin kohdistetaan lisäksi pienennetty osavarmuusluku $\gamma_{Q,red}$ = γ_Q/γ_G , jossa γ_G ja γ_Q ovat mitoitustavan VC1 osavarmuuslukuja. Tämä on Ympäristöministeriön käytäntö mitoitustavalla DA2* upotettujen seinien murtorajatilamitoituksessa (RIL 207-2017 2017, s. 174, 212). Väylävirasto (NCCI 7 2023, s. 25) ohjeistaa laskemaan muuttuvien kuormien vaikutuksen erikseen pysyvien ja muuttuvien kuormien vaikutuksen ja pelkkien pysyvien kuormien vaikutuksen erotuksesta.

Tässä työssä VC4:llä faktoroitiin muuttuvat kuormat laskennan alussa. Tämä käytäntö pienentää kantokestävyyttä, jos epäkeskisyys e_B ja kuormakaltevuustermit i_q , i_γ , ja i_{cu} kantokestävyyttä varten lasketaan siten, että osavarmuusluku $\gamma_{Q,red}$ on mukana, kuten tässä työssä tehtiin. Uusi eurokoodi EN 1990 ei ole kuitenkaan täysin yksiselitteinen VC4:n osavarmuusluvun $\gamma_{Q,red}$ käyttämisestä. Yhtälöiden 8.4 ja 8.5 (EN 1990 2023, s. 49–50) mukaan osavarmuusluvut kohdistetaan joko kuormiin tai kuormien vaikutuksiin, ei molempiin. Toisaalta yhtälö 8.3 (EN 1990 2023, s. 48) sallii sekä kuormien että kuormien vaikutusten faktoroinnin samaan aikaan. Lisäksi liite A:n taulukot A.1.8 ja A.2.10. (EN 1990 2023, s. 71, 97–98) esittävät asian siten, että osavarmuusluvulla $\gamma_{Q,red}$ faktoroidaan muuttuvat kuormat kuten mitoitustavoilla VC1 ja VC3 eli laskennan alussa. Lisäksi tässä työssä oletettiin, että osavarmuusluvun $\gamma_{Q,red} = \gamma_Q/\gamma_G$ laskennassa käytettyosavarmuusluku γ_G lasketaan ilman mitoitustavan VC1 kuormitusyhtälön 8.14b (yhtä-löparin 8.14 alempi yhtälö) käyttämää pienennyskerrointa *ξ*. Pienennyskertoimen käyttäminen kasvattaisi osavarmuuslukua $\gamma_{Q,red}$. Mitoitustavan VC4:n osavarmuusluvun $\gamma_{Q,red}$ käytön täsmentäminen vaatinee erillisen kansallisen valinnan tai ohjeen.

Mitoitustavalla (e) VC4+RFA ei käytetä epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerrointa ξ , joten kuormien vaikutusten mitoitusarvo E_d mitoitustavalla (e) VC4+RFA voi olla kuormitusyhtälöpareilla 8.13 ja 8.14 suurempi kuin mitoitustavalla DA2* käytettäessä kuormitusyhtälöitä 6.10a ja 6.10b. Tämä johtuu siitä, että mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA kuormien vaikutusten osavarmuusluvun oletusarvo γ_E = 1,35 (NDP) on suurempi kuin mitoitustavalla DA2*, jolla käytetään Suomessa osavarmuuslukua $\xi\gamma_G$ = 1,15 tai $\xi\gamma_G$ = 1,25 pysyvien kuormien vaikutuksille (ks. luku 2.4.2).

Lisäksi mitoitustapa *(e)* VC4+RFA poikkeaa suuresti mitoitustavasta DA2* ehdon $T_{rep} \leq 0,2N_{rep}$ (2.40) takia, mikä johti kulmatukimuurin laskentatapauksilla erittäin suuriin tukimuurileveyksiin (taulukko 6.1 ja kuva 6.1). Edellä mainitut erot on syytä ottaa huomioon tehtäessä kansallisia valintoja mitoitustavoista ja osavarmuusluvuista.

Kaikissa uusissa mitoitustavoissa on erona nykyisiin mitoitustapoihin erilliset osavarmuusluvut veden aiheuttamille pysyville ja muuttuville kuormille γ_{Gw} (VC4:llä ei käytetä) ja γ_{Qw} , joita nykyiset eurokoodit eivät tunne. Tämä vaikutti kulmatukimuurin vedellä kyllästyneissä laskentatapauksissa (luvut 5.2.4–5.2.6) mitoitustapoihin *(c)* VC1+M2 ja *(d)* VC1+RFA pienentäen tukimuurileveyttä verrattuna muihin mitoitustapoihin. Kuivan tuettavan maan tapauksissa (luvut 5.2.1 – 5.2.3) tukimuurin leveys *B* oli mitoitustavalla *(c)* VC1+M2 keskimäärin 35 % suurempi ja mitoitustavalla *(d)* VC1+RFA keskimäärin 6 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Vedellä kyllästyneen tuettavan maan tapauksissa (luvut 5.2.4 – 5.2.6) tukimuurin leveys *B* oli mitoitustavalla *(c)* VC1+M2 32 % keskimäärin suurempi ja mitoitustavalla *(d)* VC1+RFA keskimäärin 2 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Nämä keskimäärin 2 % suurempi kuin mitoitustavalla DA2* eri liikennekuormatapauksilla. Nämä keskimäärin 2

6.2 GEO-murtorajatilan laskentatapauksien tulokset

Taulukossa 6.1 esitetään edullisimmat ja epäedullisimmat mitoitustavat maanvaraisen neliöanturan (NA), kulmatukimuurin (KT) ja nosturin tukijalan (NT) laskentatapauksissa. Neliöanturan (NA) ja kulmatukimuurin (KT) laskentatapauksissa DA2* ja VC4+RFA* eli mitoitustapa (e) VC4+RFA ilman ehtoa $T_{rep} \leq 0.2N_{rep}$ olivat yleensä edullisimmat eli ta-loudellisimmat mitoitustavat, kun taas DA2, (c) VC1+M2 ja (e) VC4+RFA olivat yleensä epäedullisimmat mitoitustavat. Nosturin tukijalan (NT) laskentatapauksissa (lävistysmurtuman tutkiminen) edullisimmat olivat mitoitustapojen (a) VC1+M1 ja (b) VC3+M2 yhdistelmä ja mitoitustavat (d) VC1+RFA ja (e) VC4+RFA, ja epäedullisimmat olivat mitoitustavat tutavat DA2, DA2* ja (c) VC1+M2.

(a) ja (b) tarkastellaan yhdessä.									
Mitoitustapa	Edullisin mitoitustapa [krt] ¹				Epäedullisin mitoitustapa [krt] ²				
	NA	KT	NT	Yht.	NA	KT	NT	Yht.	
DA2	1	0	0	1	3	0	3	6	
DA2*	4	13	0	17	0	0	3	3	
(a) VC1+M1 ³	2	-	4	6	1	-	0	1	
(a) VC4+M1 ⁴	-	0	-	0	-	0	-	0	
(b) VC3+M2	2	0	4	6	1	0	0	1	
(c) VC1+M2	0	0	0	0	4	2	3	9	
(d) VC1+RFA	2	2	2	6	0	0	0	0	
(e) VC4+RFA	2	0	2	4	1	16	0	17	
VC4+RFA*	2	10	-	12	1	0	-	1	

Taulukko 6.1. Edullisimmat ja epäedullisimmat mitoitustavat maanvaraisen neliöanturan (NA), kulmatukimuurin (KT) ja nosturin tukijalan (NT) laskentatapauksissa. Mitoitustavat (a) ja (b) tarkastellaan yhdessä.

VC4+RFA viittaa mitoitusyhdistelmään VC4+RFA ilman " $T_{rep}/N_{rep} \le 0,2$ "-ehtoa (2.40). ¹ Määrä laskentatapauksista, joissa mitoitustavalla on laskentatapauksen pienin leveys *B* tai suurin maksimipystykuorma $Q_{V,k}$.

² Määrä laskentatapauksista, joissa mitoitustavalla on laskentatapauksen suurin leveys *B* tai pienin maksimipystykuorma $Q_{V,k}$.

³ Käytetään maanvaraisen neliöanturan (NA) ja nosturin tukijalan (NT) laskentatapauksissa.

⁴ Käytetään maanvaraisen kulmatukimuurin (KT) laskentatapauksissa.

Edullisimmat mitoitustavat on merkitty vihreällä, epäedullisimmat punaisella.

Kuvassa 6.1, joka on yhteenveto kuvista 5.4, 5.11 ja 5.16, esitetään maanvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin leveyden *B* sekä nosturin tukijalan maksimipystykuorman $Q_{V,k}$ kaikkien laskentatapauksien keskimääräinen suhteellinen ero eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2*. On muistettava, että suurempi maksimipystykuorma $Q_{V,k}$ tarkoittaa edullisempaa mitoitustapaa, kun taas suurempi antura- tai tukimuurileveys *B* tarkoittaa epäedullisempaa mitoitustapaa. Nykyisten ja uusien GEO-mitoitustapojen osavarmuusluvut maanvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin sekä nosturin tukijalan laskentatapauksissa on koottu taulukoihin 5.1, 5.9 ja 5.31.



Kuva 6.1. Maanvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin leveyden B sekä nosturin tukijalan maksimipystykuorman Q_{V,k} kaikkien laskentatapauksien keskimääräinen suhteellinen ero eri mitoitustavoilla verrattuna mitoitustapaan DA2*. VC4+RFA* on mitoitusyhdistelmä VC4+RFA ilman "T_{rep}/N_{rep} ≤ 0,2"-ehtoa (2.40). ¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

Neliöanturan minimileveydet ja nosturin tukijalan maksimipystykuormat erosivat kaikilla uusilla mitoitustavoilla (mitoitustavat (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdessä tarkasteltuna) keskimäärin alle 20 % mitoitustapaan DA2* verrattuna. Kulmatukimuurilla uusien mitoitustapojen välillä oli keskimäärin paljon enemmän vaihtelua. Toisaalta laskentatapauksien sisällä vaihtelua oli enemmän mitoitustapojen välillä. Neliöanturan laskentatapauksissa laskentatapauksen suurimman leveyden *B* suhteellinen ero pienimpään leveyteen *B* mitoitustapojen välillä eli *B*:n vaihteluväli-% sai arvoja välillä 12–36 % (taulukko 5.8) ja kulmatukimuurin laskentatapauksissa välillä 30–132 % (taulukot 5.28, 5.29 ja 5.30). Nosturin tukijalan laskentatapauksissa laskentatapauksen suurimman maksimipystykuorman $Q_{V,k}$ suhteellinen ero pienimpään maksimipystykuormaan $Q_{V,k}$ suhteellinen ero pienimpään hellinen ero pienimpään hellinen ero pienimpään hellinen ero pienimpään hellinen ero pienimpään

Neliöanturalla ja varsinkin kulmatukimuurilla mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuorman vaikutuksiin (DA2* ja VC4), oli antura- tai tukimuurileveys *B* pienempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan kuormiin (DA2, VC1 ja VC3). Tämä johtui siitä, että vaakakuormat pienentävät kantokestävyyttä enemmän, kun niistä käytetään mitoitusarvoja. Mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan kestävyyteen (DA2, DA2* ja RFA), oli antura- tai tukimuurileveys *B* pienempi kuin mitoitustavoilla, joissa varmuus kohdennetaan maan lujuuteen (M2). Tämä johtui siitä, että avoimen tilan kantokestävyys on epälineaarinen lujuuden suhteen ja lisäksi kulmatukimuurin tapauksissa maanpaine on sitä suurempi, mitä suurempi on kitkakulman mitoitusarvo. Näiden syiden takia mitoitustapa (*c*) VC1+M2 tuotti keskimäärin vertailluista mitoitustavoista suurimman antura- tai tukimuurileveyden, jos ei oteta huomioon mitoitustavan (*e*) VC4+RFA ehtoa $T_{rep} \leq 0,2N_{rep}$.

Mitoitustapa (*d*) VC1+RFA tuotti keskimäärin melkein yhtä pienen antura- tai tukimuurileveyden kuin mitoitustapa DA2*, vaikka (*d*) VC1+RFA kohdentaa varmuuden kuormiin eikä kuormien vaikutuksiin kuten DA2*. Mitoitustapa (*d*) VC1+RFA tuotti keskimäärin pienemmän antura- tai tukimuurileveyden kuin DA2. Nämä mitoitustavan (*d*) VC1+RFA keskimääräiset erot mitoitustapoihin DA2 ja DA2* johtuivat pääosin pienemmästä kestävyyden osavarmuusluvusta (γ_{RN} = 1,4 vs. γ_{RN} = 1,55). Erot johtuivat myös mitoitustavalla (*d*) VC1+RFA käytettävästä osavarmuusluvuista veden aiheuttamille pysyville kuormille γ_{Gw} = 1,20, koska mitoitustavoilla DA2 ja DA2* käytetään veden aiheuttamille pysyville kuormille samaa osavarmuuslukua kuin muillekin epäedullisille pysyville kuormille $\gamma_{G,sup}$ = 1,35.

Vaikka mitoitustavoilla (e) VC4+RFA ja VC4+RFA* on pienempi kestävyyden osavarmuusluku kuin mitoitustavalla DA2* ($\gamma_{RN} = 1,4$ vs. $\gamma_{RN} = 1,55$), mitoitustapa (e) VC4+RFA tuotti keskimäärin 3 % suuremman anturaleveyden kuin DA2*, ja mitoitustapa VC4+RFA* eli mitoitustapa (e) VC4+RFA ilman ehtoa $T_{rep} \leq 0,2N_{rep}$ (2.40) tuotti keskimäärin yhtä suuren tukimuurileveyden kuin DA2*. Tämä johtuu siitä, että mitoitustavoilla (e) VC4+RFA ja VC4+RFA* käytettiin muuttuville kuormille osavarmuuslukua $\gamma_{Q,red} =$ 1,11 epäkeskisyyden e_B ja kuormakaltevuuskertoimien i_q ja i_V laskennassa, mikä pienensi kantokestävyyttä. Lisäksi mitoitustavalla (e) VC4+RFA ei käytetä epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerrointa ξ kuormitusyhtälöllä 8.13b tai 8.14b toisin kuin mitoitustavalla DA2* kuormitusyhtälöllä 6.10b. Mitoitustapa (e) VC4+RFA tuotti ehdon $T_{rep} \leq$ 0,2 N_{rep} (2.40) takia keskimäärin 64 % suuremman tukimuurileveyden.

Nosturin tukijalan laskentatapauksissa (lävistysmurtuman tutkiminen) mitoitustapojen edullisuuteen eniten vaikutti kuormiin tai kuorman vaikutuksiin kohdistettujen osavarmuuslukujen suuruus. Mitoitustapojen (*a*) VC1+M1 ja (*b*) VC3+M2 yhdistelmä oli edullisin neljässä tapauksessa, koska ensimmäisen lujuuden ja kestävyyden osavarmuuslukujen arvot ovat 1,0 ja koska toinen kohdistaa pienemmän osavarmuusluvun kuormiin kuin muut mitoitustavat. Tapauksissa, joissa tukijalan pohja on pieni (1,0 m x 1,0 m) ja täyttökerroksen paksuus on suuri ($D_1 = 2,0$ m) mitoitustapa (*b*) VC3+M2 oli epäedullisempi kuin DA2, DA2*, (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA, ja mitoitustapa (*c*) VC1+M2 oli epäedullisin mitoitustapa. Tämä johtui siitä, että mitoitustavoilla (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 maan kitkakulman osavarmuusluku $\gamma_{\varphi'}$ oli arvoltaan 1,25 eikä 1,0 kuten muilla mitoitustavoilla. Tämän takia mitoitustavoilla (*b*) VC3+M2 ja (*c*) VC1+M2 kantokestävyys yksin täyttökerroksessa $R_{Nt,d}$ oli pienempi kuin täyttökerroksen lävistyskestävyyden ja saven kantokestävyyden yhdistelmä $R_{Nu,d}$ ja murtuminen tapahtuu yksin täyttökerroksessa. Tarkempi selitys näistä tuloksista on luvussa 5.3.3 ja lävistysmurron teoriasta luvussa 3.6.

Kaikissa tapauksissa DA2, DA2* tai (*c*) VC1+M2 eli epäedullisin. Mitoitustavat DA2 ja DA2* olivat epäedullisempi kuin mitoitustavat (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA suuremman kantokestävyyden osavarmuusluvun takia. Mitoitustavat DA2 ja DA2* tai mitoitustavat (*d*) VC1+RFA ja (*e*) VC4+RFA eivät eronneet toisistaan, koska ei ollut väliä kohdistettiinko osavarmuusluvut kuormaan (DA2, VC1, VC3) vai kuorman vaikutukseen (DA2*, VC4). Tämä johtuu siitä, että kuormat eivät vaikuttaneet kestävyyteen, koska vaakakuormia ei ollut. Koska pysyviä kuormia ei ollut, epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskertoimen ξ puuttuminen mitoitustavalla (*e*) VC4+RFA ei vaikuttanut vertailuun.

Neliöanturan laskentatapausten tulosten vertailussa on syytä ottaa huomioon, että tutkimuksessa rajoitettiin kuormien mitoitusarvoilla laskettua epäkeskisyyttä $e_{B,d}$ ehdolla " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " mitoitustavoilla VC1 ja VC3. Ilman tätä rajoitusta kuivan tiiviin moreenin laskentatapauksessa suurella vaakakuormalla anturaleveys näillä mitoitustavoilla olisi ollut selvästi pienempi. Kulmatukimuurin laskentatapauksien mitoitusleveyksiin tämä rajoitus ei vaikuttanut.

Ehto " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " perustuu uuden eurokoodi 7:n luonnoksen (prEN 1997-3 2022, s. 72) kohtaan 5.6.2.2(6), jonka mukaan epäkeskisyyden ollessa yli 1/3 suurempi kuin suorakulmaisen perustuksen leveys, on ryhdyttävä "erityisiin varotoimenpiteisiin", kuten "kuormien mitoitusarvojen huolelliseen uudelleen tarkasteluun" ja "perustuksen reunan sijainnin suunnitteluun rakentamistoleranssien suuruus huomioon ottaen". Ei ole kuitenkaan täysin yksiselitteistä, viittaako tämä kohdan 5.6.2.2(6) epäkeskisyys (engl. the eccentricity) kohdan 5.6.2.2(5) mitoitusepäkeskisyyteen (engl. the design eccentricity). Kohdan 5.6.2.2(5) mukaan mitoitusepäkeskisyys lasketaan käyttäen kunkin mitoitustavan mukaisia kuormien mitoitusarvoja. Ehto poikkeaa nykyisen eurokoodin yleisistä käytännöistä (ks. luku 2.3.2). Mitoitustavalla VC4 ehtoa " $e_{B,d}/B \le 1/3$ " ei laskentatapauksissa käytetty, vaikka muuttuviin kuormiin kohdistettiinkin muuten laskennassa osavarmuusluku $\gamma_{Q,red}$. Sen sijaan käytettiin ehtoa (2.22) " $e_{B,k}/B \le 1/3$ ". Epäkeskisyys kuormien ominaisarvoilla laskettuna $e_{B,k}$ on pienempi kuin mitoitusarvoilla laskettuna $e_{B,d}$ myös mitoitustavalla VC4, vaikka pysyviin kuormiin ei mitoitustavalla VC4 kohdisteta osavarmuuslukua, jos laskenta sisältää muuttuvia kuormia ja käytetään kuormitusyhtälöä 8.14b tai muuta kuormitusyhtälöä, joka sisältää muuttuvat kuormat. Tämä " $e_{B,d}/B \le 1/3$ "-ehto olisi suurentanut anturaleveyttä VC4:llä yhdessä työn laskentatapauksessa, kuivan tiiviin moreenin suuren vaakakuorman laskentatapauksessa 0,1 metrillä (ks. luku 5.1.1).

Koska antura- tai tukimuurileveys *B* voi iterointitarkkuuden takia saada arvoja vain 0,1 m välein, mitoitustulos määräävälle ehdolle voi olla suhteellisen kaukanakin ehdon rajaarvosta. Esimerkiksi eräässä laskentatapauksessa eräällä mitoitustavalla kantokestävyyden ylimitoituskerroin oli jopa $ODF_{KK} = 1,31$, vaikka kantokestävyysehto (2.31) oli määräävä ehto mitoituksessa. Tämä johtui siitä, että 0,1 m pienempi anturaleveys olisi laskenut kantokestävyyden ylimitoituskertoimen ODF_{KK} alle 1,0 kantokestävyyskaavan epälineaarisuuden takia. Iterointitarkkuuden pienentäminen, esimerkiksi 0,01 metriin olisi tuottanut tarkempia vertailutuloksia, mutta toisaalta anturan ja tukimuurien valmistus- ja rakentamisteknisistä syistä tulokset olisivat silloin epätodellisempia. Toinen vaihtoehto olisi ollut vertailla leveyden *B* kanto- ja liukumiskestävyyden ylimitoituskertoimia ODF_{KK} ja ODF_{LK} sekä epäkeskisyyksiä $e_{B,d}$, $e_{B,k}$ ja $e_{B,G,k}$. Tosin näiden suureiden vertailu olisi ollut vaikeammin ymmärrettävää tutkimuksen lukijoille näiden suureiden abstraktisuuden takia. Lisäksi kantokestävyyden ylimitoituskertoimien ODF_{KK} vertailu on epämääräistä kantokestävyyden epälineaarisuuden takia.

Kaikkien mitoitustapojen käyttäminen onnistui kaikissa laskentatapauksissa, koska laskenta tehtiin analyyttisin laskentamenetelmin. Mitoitustavoilla DA2 ja VC1 kohdistetaan osavarmuusluvut pysyviin kuormiin, mikä voi tehdä niistä mahdottomia käyttää geoteknisissä laskentaohjelmissa, jotka käyttävät numeerisia menetelmiä ja joissa syöttöparametrit eivät ole kuormia vaan mm. geometriaa ja tilavuuspainoja. Tämän takia on tärkeää, että muut mitoitustavat tuottavat teknisesti ja taloudellisesti järkeviä antura- ja tukimuurileveyksiä sekä muita geoteknisiä rakenteita.

Laskentatapaukset olivat monipuolisia mutta yksinkertaisia. Tapaukset eivät mm. sisältäneet maanpinnan kaltevuutta tai perustusta luiskassa, koska sen varioiminen käytettäessä analyyttista kantokestävyysyhtälöä ei olisi muuttanut suhteellisia eroja mitoitustapojen välillä eikä siten tuottanut lisätietoa, koska mitoitustapa ei vaikuta kertoimen (3.34) tai (3.36) arvoon. Uusista GEO-mitoitustavoista voisi olla hyödyllistä tehdä numeerisin menetelmin lisätutkimusta maanvaraisen anturan, tukimuurin ja nosturin tukijalan monimutkaisemmista laskentatapauksista. Numeerisin menetelmin olisi voitu vertailla esimerkiksi kerroksellisen tai kaltevan maan tapauksia tai tapauksia, joissa antura tai tukimuuri on perustettu luiskaan tai joihin liittyy suotovirtauksia tai paineellista pohjavettä.

6.3 EQU-murtorajatilan mitoitustavat ja laskentatapauksien tulokset

EQU-mitoitustapoja verrattiin kallionvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin laskentatapauksissa. Laskentatapauksissa verrattiin staattisen tasapainon murtorajatilaa sekä tarkistettiin liukumiskestävyys. Uusissa eurokoodeissa staattinen tasapaino osoitetaan todentamalla, että kaatavat mitoitusmomentit ovat pienempiä tai yhtä suuria kuin vakauttavat mitoitusmomentit eli kuten nykyisen eurokoodi 7:n yhtälössä (2.41), kun leikkauskestävyyttä $R_{EQU,d}$ ei oteta huomioon. Mikäli leikkauskestävyys otetaan huomioon, on kyseessä kaatuminen, johon liittyy maan murtuminen ("overturning"), joka mitoitetaan kantokestävyyden kautta.

Staattisen tasapainon osoittamiseen on uusissa eurokoodeissa yksi mitoitustapa, VC2, josta on kaksi osavarmuuslukusarjaa, VC2(a) ja VC2(b), joista käytetään epäedullisempaa yhdistelmää. Näiden sarjojen pysyvien kuormien osavarmuusluvut (taulukko 2.9) poikkeavat selvästi nykyisistä Suomessa käytettävistä YM:n ja LVM:n EQU-murtorajatilan kuormitusyhtälöiden (2.44) – (2.47) osavarmuusluvuista. Taulukkoon 6.2 on koottu staattisen tasapainon pysyvien kuormien osavarmuusluvut nykyisen eurokoodi 7:n Suomen kansallisten liitteiden ja uuden eurokoodin EN 1990:2023 mukaisesti ilman kuormakerrointa K_{Fl} ja seuraamuskerrointa k_F . Mitoitustavalla VC2 käytetään vakauttavan pysyvän kuorman osavarmuuslukua $\gamma_{G,fav}$, kun nykyinen EQU-mitoitustapa käyttää vain jälkimmäistä. Vakauttavan ja edullisen pysyvän kuorman erosta on tarkemmin luvussa 2.5.2. Uusia osavarmuuslukuja ovat myös pysyvien vesikuormien kaatava ja vakauttava osavarmuusluku γ_{Gw} ja $\gamma_{Gw,stb}$. Lisäksi EN 1990:2023 sisältää muuttuville kaataville vesikuormille osavarmuusluvun $\gamma_{Qw} = 1,35k_F$.

Kuorma	Kuorman vai- kutus	LVM NA EN 1997-1 2015 ja YM NA EN 1997-1 2018				EN 1990:2023 (taulukot A.1.8 ja A.2.10)		
		Symboli	LVM	YM	Mallik. (NCCI 7)	Symboli	VC2(a)	VC2(b)
Pysyvä kuorma	epäedullinen / kaatava	¥G,sup	1,15	1,1	1,20	¥G	1,35	1,0
	vakauttava	-	-	-	-	γ G,stb	1,15 / 1,25	1,0
	edullinen	γ G,inf	0,90	0,90	-	γ G,fav	1,0	1,0
Pysyvä vesi- kuorma	epäedullinen / kaatava	-	-	-	-	γ _{Gw}	1,2	1,0
	vakauttava	-	-	-	-	¥Gw,stb	1,0	1,0

Taulukko 6.2. Staattisen tasapainon pysyvien kuormien osavarmuusluvut nykyisen eurokoodi 7:n Suomen kansallisten liitteiden ja uuden eurokoodin EN 1990:2023 mukaisesti ilman kuormakerrointa K_{FI} ja seuraamuskerrointa k_{F} .

Lisäksi uudessa eurokoodissa EN 1990:2023 ei oteta kantaa maan lujuuden osavarmuuslukuihin, jotka voivat vaikuttaa kaataviin tai vakauttaviin kuormiin, kuten kallionvaraisen tukimuurin tapauksissa, toisin kuin nykyisessä eurokoodi 7:ssä tai sen kansallisissa liitteissä (taulukko 2.8). Tähän on syytä ottaa kantaa uuden eurokoodin Suomen kansallisissa liitteissä tai soveltamisohjeissa.

Kuvissa 5.17 ja 5.18 on esitetty kallionvaraisen neliöanturan ja kulmatukimuurin laskentatapauksien mitoitusleveydet *B*. Uudella mitoitustavalla VC2 anturaleveys *B* on 5 % pienempi kuin nykyisellä EQU-mitoitustavalla. Mitoitustavalla VC2+M1 tukimuurileveys *B* oli 12–15 % pienempi, mitoitustavalla VC2+M2 5–6 % pienempi ja Suomen nykyisellä EQUmitoitustavalla ilman mallikerrointa 3–6 % pienempi kuin Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla mallikertoimella γ_{MK} = 1,20 eri laskentatapauksissa. Erot johtuivat lujuuden osavarmuusluvuista ja mallikertoimen käyttämisestä. Lisäksi uudella mitoitustavalla VC2 antura- ja tukimuurileveydet *B* olivat pienempiä kuin Suomen nykyisellä EQU-mitoitustavalla, koska uudella mitoitustavalla VC2 pysyvän edullisen kuorman osavarmuusluku $\gamma_{G,fav}$ = 1,0 oli suurempi kuin nykyisellä EQU-mitoitustavalla $\gamma_{G,inf}$ = 0,9. Toisaalta nykyisellä EQU-mitoitustavalla tukimuurileveyttä *B* pienensi se, että tällä on pienempi pysyvän epäedullisen kuorman osavarmuusluku ($\gamma_{G,sup}$ = 1,15) kuin uudella mitoitustavalla (γ_G = 1,35).

Kaikilla mitoitustavoilla määräävä ehto oli siis staattinen tasapaino eikä liukumiskestävyys kaikissa laskentatapauksissa, koska antura- ja tukimuurileveydet *B* olivat pieniä suhteessa vaakakuorman momenttivarsiin *h* ja *y*. Mitoitustavoista VC2(a) ja VC2(b) oli VC2(a) määräävä kaikissa laskentatapauksissa paitsi neliöanturan laskentatapauksessa, jossa mitoitustavat VC2(a) ja VC2(b) olivat identtiset. Tutkimuksessa ei käynyt selville, missä tilanteessa VC2(b) olisi määräävä.

LÄHTEET

Bond, A. & Harris, A. (2008). Decoding Eurocode 7. Taylor & Francis. 616 s.

Briaud, J. (2013). Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. John Wiley & Sons, Inc. 998 s.

Caquot, A. & Kerisel, J. (1966). Traité de méchanique des sols. Gauthier-Villars.

Das B. (2011). Principles of Foundation Engineering. 7th edition. Cencage Learning. 794 s.

EN 1990 (2005). Eurooppalaisen standardin vahvistettu suomalainen kansallinen standardi SFS-EN 1990:2002/A1:2005. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

EN 1990 (2023). Eurooppalainen standardi SFS-EN 1990:en Eurocode. Basis of structural and geotechnical design. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

EN 1997-1 (2013). Eurooppalaisen standardin vahvistettu suomalainen kansallinen standardi SFS-EN 1997-1:2004/A1:2013. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

EN 1997-2 (2007). Eurooppalaisen standardin vahvistettu suomalainen kansallinen standardi SFS-EN 1997-2:2007. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvadas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T. & Schuppener, B (2005). Designers' guide to EN 1997-1 Eurocode 7: geotechnical design - general rules. Thomas Telford.

Knappett, J. & Craig, R. F. (2020). Craig's soil mechanics. 9th edition. CRC Press.

Lastunen, A. (2021). Eurokoodit – tarkoitus. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Saatavissa: https://www.eurocodes.fi/eurokoodit-tarkoitus/

Lastunen, A. (2023). Toisen sukupolven eurokoodit eivät ole vielä käytössä. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Saatavissa: https://www.eurocodes.fi/toisen-sukupolven-eurokoodit-eivat-ole-viela-kaytossa/

LVM NA EN 1990 (2015). Kansallinen liite (LVM) standardiin SFS-EN 1990:2002/A1:2005. Liikenne- ja viestintäministeriö.

LVM NA EN 1997-1 (2015). Kansallinen liite (LVM) standardiin SFS-EN 1997-1:2004/A1:2013. Liikenne- ja viestintäministeriö.

Meyerhof, G.G. & Hanna, A.M. (1978). Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load. Canadian geotechnical journal. Vol.15 (4), s. 565–572.
NCCI 7 (2023). Eurokoodin soveltamisohje. Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Väyläviraston ohjeita 14/2023.

prEN 1997-1 (2022). Eurooppalaisen standardin luonnos prEN 1997-1:2022. Euroopan standardointikomitean tekninen komitea CEN/TC 250.

prEN 1997-3 (2022). Eurooppalaisen standardin luonnos prEN 1997-3:2022. Euroopan standardointikomitean tekninen komitea CEN/TC 250.

RATO3 (2018). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3 Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 13/2018.

RIL 157-1 (1985). Geomekaniikka I. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

RIL 157-2 (1990). Geomekaniikka II. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

RIL 207-2017 (2017). Geotekninen suunnittelu. Eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

RIL 263-2014 (2014). Kaivanto-ohje. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

RTT ry. Toisen sukupolven eurokoodien tilanne nyt. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Saatavissa: https://www.eurocodes.fi/eurokoodien-tilanne-nyt/

YM NA EN 1990 (2016). Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990:2002/A1:2005. Ympäristöministeriö.

YM NA EN 1997-1 (2018). Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1997-1:2004/A1:2013. Ympäristöministeriö.

Van Baars S. (2018). 100 Years of Prandtl's Wedge. IOS Press BV. 135 s.

Vogt N. (2019). Background Document concerning DC 1 – DC 4 – DA 2 – DA 2* for bearing pressures of spread foundations.

Liite A: Maanvaraisen neliöanturan laskentatapauksien yksityiskohtaiset tulokset												¹ Mitoi *VC4+							itustavoista (a) ja (b) epäedullisempi +RFA* viittaa mitoitusyhdistelmään V										
					DA2			61	DA2*			(a) ¹ VC1+M1 8.14a \$				0 1 4 -	(b) ¹ VC3+	+M2 0 1 /1	h	0 1 /	+M2 8 14b		0 14	(d) VC1-	+RFA 0 1 /	ь	(e) 8 145	/C4+RFA ۶ 1/۱۰	
s Perustu P	onjav esi	Maaper ä	vaakak uorma	Input & output	Vmax V	n min Vma	ax Vmir	n Vmax	Vmin	Vmax	Vmin	Vmax N	+a /min V	/max Vmi	in Vm	ax Vr	nin Vr	max V	/min	Vmax V	na /min V	max V	min	Vmax V	a /min V	۰.14 max ۱/	/min	Vmax Vmin	Vmax Vn
Neliöan K	uiva,	Tiivis moreen	Suuri vaakaku	N_d [kN]	1685	1124 1	1811 1	124 1558		1702	1327	1735	1285	1853	1285	1231	1231	1556	1231	1735	1285	1853	1285	1735	1285	1853	1285	1577	1952
p	ohjav	i, φ' =	orma	г_а [кім] e_B,d/B	0	0	225	225 0		225	225	0	0	225	0,32	0	0	195	0,32	0	0	225	0,32	0	0	225	0,32	0	225
	että	38°,γ = 19		ODF_KK	10,95	16,42	2,97 1	L,21 6,71		1,66	1,37	19,44	26,25	5,96	4,06	8,94	8,94	2,00	1,52	8,12	10,96	2,56	1,79	13,89	18,75	4,26	2,90	8,14	1,65
		kN/m3		B min ODE KK	1.24	2,8		4.07	2	,2		4.00	3,0			4.52	2,7			4 70	3,0			2.00	3,0)		4.20	2,3
				T_rep [kN]	1,21			1,37				4,06				1,52				1,79				2,90				1,20	
				N_rep [kN]																									
				T_rep/N_rep ODF LK		2.55			2	64			A 46				2.05				2 5 7	,			4.04	5			4.09
				e_B,k/B		3,33			5,	U4	0,32		4,40				5,55				5,57				4,00	5			4,50
			Pieni vaakaku	N_d [kN]	1424	949 1	1588	949 1413		1579	1204	1403	1040	1571	1040	1063	1063	1388	1063	1448	1072	1608	1072	1413	1047	1579	1047	1413	1788
			orma	e_B,d/B ODF_KK B min ODF_KK	0	U	75	75 0		/5	/5	0	0	/5	0.23	0	0	65	0.15	0	0	/5	0.16	0	0	/5	0.21	0	/5
					2,22	3,33	1,21 1	L,32 1,87		1,09	1,27	2,41	3,26	1,19	1,22	2,34	2,34	1,14	1,27	2,00	2,70	1,18	1,38	2,07	2,80	1,08	1,15	2,07	1,02
					1 21	1,3		1.09	1	,2		1 10	1,1			1 14	1,4			1 19	1,5			1 09	1,2	2		1.02	1,2
				T_rep [kN]	1,21			1,05				1,15				1,14				1,10				1,00				1,02	
				N_rep [kN]																									
				T_rep/N_rep ODF LK		8.99			9.	91			10.8	3			10.22	2			8.94	1			9,91	1			13.39
				e_B,k/B							0,14							_								_			
		Löyhä hiekka.	Suuri vaakaku	N_d [kN]	1747	1165 1	1863 1	165 1613		1749	1374	1699	1259	1823	1259	1259	1259	1584	1259	1747	1294	1863	1294	1699	1259	1823	1259	1655	2030
		φ' = 32	orma	e_B,d/B	0	U	225	225 0		225	225	0	U	225	0,33	0	0	195	0,28	0	0	225	0,30	0	0	225	0,33	0	225
		°,γ= 16		ODF_KK	5,10	7,64	1,73 1	L,08 3,39		1,12	1,07	6,97	9,41	2,14	1,44	4,52	4,52	1,23	1,04	3,78	5,10	1,32	1,02	4,98	6,72	1,53	1,03	4,35	1,26
		kN/m3		в min ODF_KK	1.08	3,2		1.07	2	,6		1.44	3,0			1.04	3,0			1.02	3,2			1.03	3,0)		1.12	2,8
				T_rep [kN]																									
				N_rep [kN] T_rep/N_rep																									
				ODF_LK		2,94			3,	02			3,50)			3,23				2,88	;			3,18	В			4,18
			Dioni	e_B,k/B	4470	005		005 4470		4624	0,27	4450	4075	1614	1075		4405	4.420	4405	4500	4420	4670	4420	4470	4005	4624	4005	4.470	4050
			vaakaku	T_d [kN]	1478 0	985 1 0	75	985 1478 75 0		1634 75	1259 75	1452 0	1075 0	1611 : 75	1075 : 75	1105 0	1105 0	1430 65	1105 65	1523 0	1128 0	1672 75	1128 75	1478 0	1095 0	1634 75	1095 75	14/8 0	1853
			orma	e_B,d/B								0	0	0,1018	0,15	0	0 0	0,0837	0,11	0	0	0,0748	0,11	0	0	0,0893	0,13		
				ODF_KK B	1,60	2,40	1,01 1	L,28 1,60	1	1,09 8	1,31	1,94	2,62	1,17	1,39	1,83	1,83	1,02	1,18	1,66	2,24	1,12	1,41	1,77	2,39	1,12	1,37	1,77	1,03
				min ODF_KK	1,01	_,0		1,09		,0		1,17	_,0			1,02	_,,,			1,12	-,-			1,12	_,:			1,03	_,.
				T_rep [kN]																									
				T_rep/N_rep																									
				ODF_LK		7,46			8,	29			8,96	5			8,50)			7,52	!			8,29	9			11,19
		Karkear	Suuri	е_в,к/в N_d [kN]	2291	1528 2	2327 1	528 2213		2260	0,09	2032	1506	2106	1506	1557	1557	1882	1557	2213	1639	2260	1639	2213	1639	2260	1639	2252	2627
		akeine	vaakaku	T_d [kN]	0	0	225	225 0		225	225	0	0	225	225	0	0	195	195	0	0	225	225	0	0	225	225	0	225
		täyttö	Urma	e_B,d/B ODF KK	1 52	2.28	1 02 1	1 44		1 04	1 19	1 92	2 60	1.07	0,21	2 07	2 07	1 01	0,16	1 67	2.26	1 02	0,17	1.60	2 16	1 02	0,17	1 64	1.01
		(φ' = 38 °. v =		В	2,02	4,7		2,20	4	,5	1)15	2,52	4,0	2,07		2,07	4,2	2,02	2,20	2,07	4,5	2,02		2,00	4,5	1,02	2,20	2,01	4,6
		19		min ODF_KK	1,02			1,04				1,07				1,01				1,02			_	1,02				1,01	
		siltin		N_rep [kN]																									
		päällä (cu 25		T_rep/N_rep										-												_			
		(su 35 kPa)		e_B,k/B		4,82			5,	18	0,11		5,23	3			4,99				4,55)			5,18	8			7,11
			Pieni	N_d [kN]	1999	1333 2	2078 1	333 1966		2050	1675	1761	1304	1875	1304 :	1345	1345	1670	1345	1903	1410	1996	1410	1934	1433	2023	1433	1999	2374
			vaakaku orma	T_d [kN] e B.d/B	0	0	75	75 0		75	75	0	0	75	75	0	0	65	65	0	0	75	75	0	0	75	75	0	75
				ODF_KK	1,20	1,80	1,03 1	L,54 1,16		1,02	1,23	1,33	1,80	1,06	1,44	1,48	1,48	1,02	1,23	1,24	1,68	1,03	1,40	1,24	1,67	1,05	1,42	1,33	1,02
				B min ODE KK	1.02	3,9		1.02	3	,8		1.06	3,1			1 02	3,3			1.02	3,6			1.05	3,7	,		1.02	3,9
				T_rep [kN]	1,05			1,02				1,00				1,02				1,05				1,05				1,02	
				N_rep [kN]																									
				ODF_LK		12,62			13	,79			13,5	9			12,93	3			11,7	5			13,5	57			18,93
				e_B,k/B							0,03												·						
Perustu P s	ohjav esi	Maaper ä	Vaakak uorma	Input & output	Vmax V 6.10	nin Vma a	ax Vmir 6.10b	1 Vmax 6.1	Vmin .0a	Vmax 6.1	Vmin Ob	Vmax \ 8.14	/min V 1a	max Vmi 8.14b	in Vma	ax Vn 8.14a	min Vr 1	max V 8.14	/min b	Vmax \ 8.14	/min V la	max V 8.14	min b	Vmax V 8.14	'min V a	/max \ 8.14	/min lb	Vmax Vmin 8.14a	Vmax Vm 8.14h
						DA2			DA	·2*			(a) ¹ VC1	+M1			(b)1 VC3+	+M2			(c) VC1-	+M2			(d) VC1-	+RFA		(e)	VC4+RFA



Liite	B: I	Maar	ivara	isen kulr	natul	kimu	urin l	laske	entatap	oauksi	ien yl	/ksityiskohtaiset tulokset											¹ N *V	¹ Mitoitustavoista (a) ja (b) epäe *VC4+RFA* viittaa mitoitusyhdi			äedullisempi o Idistelmään Vo
					DA2					DA2*		(a) ¹ VC4+M1				(b) ¹ VC3	+M2		(c) VC1+l	V12		(d) VC1+l	RFA		(e)	VC4+RFA
Perustu	Perustu Pohjav Maaper Vaakak			Innut & output	0.10a 6. Vmax Vmin Vmax			nin Vr	6.10a	6. Vmax	10b Vmin	8.14a	in Vm	8.14b	8.1	4a Vmin V	8.14b	8.14	la Imin Vin	8.14b		8.14a	in Vr	8.14b	nin V	8.14a	8.14b
s Kulmat	Kuiva.	a	Rautati	N d [kN/m]	408	272	/12	272	329	Vmax 333	Vmin 305	221	in vr	3/17 3	vmax 21 315	215	346 3'	Vmax V	7min Vn 347		1 VII	373	276	3/10	276	756	823
ukimuu	ei	moreen	eliikenn	T_d [kN/m]	408 54	54	155	155	54	155	155	54		159 1	59 49	49	160 10	50 66	66	185	185	54	54	151	151	54	159
ri, h = 3	pohjav	i, φ' =	ekuorm	e_B,d/B												0,04	0,:	18	0,05		0,17		0,06		0,22		
m	että	38°, γ	а	ODF_KK	13,76	15,20	3,13	1,02	9,08	1,44	1,17	13,29		1,48 1,	13 10,60	10,60	1,37 1,0	9,41	10,19	1,91	1,05	12,91	13,69	2,13	1,00	39,27	21,15 2
		= 19 kN/m3		В		4,6	i i			3,7			3,6			4,8			5,3				4,2				8,6
				min ODF_KK	1,02				1,17			1,13			1,05			1,05				1,00				21,15	
				T_rep [kN/m]																							
				N_rep [kN/m]																							
						2.60		1.25	2 22		1 1 2	2.46		1	17	4.05	1	2	2 21		1 10		2 66		1 20	7.41	
				e B.k/B	-	3,00		1,25	0.06	0	21	0.06		0.23	0	4,05 04	±,,	0.0	4	_	1,10	0.05	3,00		1,50	0.01	0.04
			Maanti	N_d [kN/m]	260	173	262	173	225	226	208	208		224 2	08 199	199	218 19	295	218	275	218	234	173	217	173	408	443
			eliikenn	T_d [kN/m]	54	54	79	79	54	79	79	54		83	33 49	49	79	79 66	66	92	92	54	54	75	75	54	83
			ekuorm	e_B,d/B												0,10	0,:	19	0,11	(0,18		0,14		0,24		
			a	ODF_KK	5,17	4,18	2,56	1,15	3,40	1,42	1,21	4,01		1,31 1,	3,56	3,56	1,30 1,0	3,43	2,96	1,69	1,12	4,24	3,42	1,81	1,03	15,24	10,44 1
				В		2,9)			2,5			2,3			3,0			3,3				2,6				4,6
				min ODF_KK	1,15	_	_		1,21			1,05			1,08			1,12			_	1,03				10,41	
				N ren [kN/m]																							
				T rep/N rep																							
				ODF LK		2 29		1 56	2 21		1 50	2 24		1	15	2 56	1	7	2.08		1 49		2 29		1 64	4 00	
				e_B,k/B		-,			0,12	0	,21	0,14		0,25	0,	10		0,0	9			0,11	2,23			0,04	0,06
			Ei	N_d [kN/m]	199	133	184	133	190	176	176	190		190 1	90 154	154	154 1	54 234	173	199	173	190	141	162	141	269	269
			liikenne	T_d [kN/m]	54	54	50	50	54	50	50	54		54	54 49	49	49	19 66	66	56	56	54	54	46	46	54	54
			kuorma	e_B,d/B												0,17	0,3	L7	0,17	(0,15		0,22		0,19		
				ODF_KK	2,21	1,17	2,39	1,50	1,85	2,00	2,00	2,86		2,86 2,	36 1,41	1,41	1,41 1,4	1,67	1,14	1,96 3	1,71	2,05	1,27	2,41	2,02	6,25	6,25
				B min ODE KK	1 17	2,2	<u> </u>		1.05	2,1		2.90	2,1		1.41	2,3		1.14	2,6			1 27	2,1			6.25	3,0
				T rep [kN/m]	1,17				1,85			2,80			1,41			1,14				1,27				0,25	
				N_rep [kN/m]																							
				T_rep/N_rep																							
				ODF_LK		1,75		1,89	1,86		2,01	2,05		2,	05	1,98	1,9	8	1,65		1,94		1,86		2,19	2,63	
				e_B,k/B					0,16	0,	,16	0,16		0,16	0,	17		0,1	3			0,16				0,01	0,09
		Löyhä	Rautati	N_d [kN/m]	538	359	546	359	434	439	402	417		452 4	17 405	405	446 40	599	444	562	444	495	367	464	367	869	947
		піекка, ф' = 32	eliikenn	T_d [kN/m]	55	55	180	180	55	180	180	55		184 1	34 48	48	179 1	79 65	65	207	207	55	55	176	176	55	184
		°, γ =	а	e_B,d/B												0,03	0,:	12	0,03	(0,12		0,04		0,15		
		16		B	7,03	8,49	2,11	1,04	4,93	1,1/	1,03	7,10	47	1,23 1,	03 6,30	6,30	1,22 1,0	5,40	6,23	1,49	1,01	6,81	/,// E 6	1,66	1,04	15,28	8,06
		kN/m3		min ODF KK	1.04	0,1	-		1.03	4,5		1.03	4,7		1.03	0,2		1.01	0,8			1.04	3,0			8.06	5,5
				_ T_rep [kN/m]								-/			-,												
				N_rep [kN/m]																							
				T_rep/N_rep	_																						
				ODF_LK		3,69		1,13	3,30		1,01	3,49		1,)5	4,21	1,:	13	3,41		1,07		3,77		1,18	6,62	
			Maanti	e_B,k/B					0,04	0,	,14	0,04		0,16	0,	03		0,0	2			0,03				0,01	0,03
			eliikenn	$N_d [kN/m]$	329	220	333	220	295	297	2/3	269		290 2	25/	257	282 2	3/3	276	349	2/6	303	225	283	225	451	490
			ekuorm	e B.d/B	55	55	87	87	55	8/	8/	55		91	48	48	84 0	34 65	0.07	97	97	55	0.09	83	0.16	55	91
			а	ODF_KK	2.89	2.81	1.61	1.01	2.25	1.16	1.07	2.76		1.17 1.	2.64	2.64	1.21 1.3	10 2.29	2.29	1.32	1.06	2.66	2.55	1.40	1.03	5.84	3.89
				В	,	3,7	,	· ·		3,3			3,0			3,9			4,2				3,4	,			5,1
				min ODF_KK	1,01				1,07			1,05			1,10			1,06				1,03				3,89	
				T_rep [kN/m]																							
				N_rep [kN/m]																							
				T_rep/N_rep							_							_	_				_				
					_	2,26		1,43	2,24		1,42	2,25		1,	36	2,67	1,	53	2,12		1,42	0.07	2,31		1,54	3,44	0.00
			Fi	е_Б,к/Б N d [kN/m]	251	167	222	167	225	208	,14	100	_	0,17	186	186	196 1	0,0	212	242	212	224	172	100	172	277	0,06
			liikenne	T d [kN/m]	55	55	233 51	51	55	51	51	55		55	5 48	180	48 4	18 65	65	55	55	55	55	47	47	55	55
			kuorma	e_B,d/B	55		51	51	55			55		55		0,11	0,3	11	0,12	(0,10	55	0,15		0,13	55	
			а	ODF_KK	1,48	1,12	1,60	1,32	1,06	1,15	1,15	1,06		1,06 1,	06 1,11	1,11	1,11 1,1	1,21	1,03	1,42	1,35	1,33	1,05	1,56	1,44	2,14	2,14
				В		2,8	3			2,5			2,2			2,8			3,2				2,6				3,1
				min ODF_KK	1,12				1,06			1,06			1,11			1,03				1,05				2,14	
				T_rep [kN/m]																							
				N_rep [kN/m]																							
						1.72		1.90	1 71		1.05	1.00		-	c	1.02		12	1.02		1.02		1 70		2.00	2.11	
				e B.k/B		1,72		1,80	0.12	0	1,85	0.15		0.15		1,93	1,		9		1,92	0 11	1,78		2,09	0.08	0.02
Perustu	Pohiav	Maaner	Vaakak	,	Vmax V	/min Vr	max Vn	nin Vr	max Vmin	Vmax	Vmin	Vmax Vm	in Vm	nax Vmin	Vmax	Vmin V	max Vmin	Vmax V	/min Vn	nax Vmi	n Vm	nax Vm	in Vr	max Vn	nin V	max Vmin	Vmax Vm
S	esi	ä	uorma	Input & output	6.10	a	6.10b		6.10a	6.	10b	8.14a		8.14b	8.1	.4a	8.14b	8.14	la	8.14b		8.14a		8.14b		8.14a	8.14b
					DA2			DA2*			(a)1 VC4+l	M1		(b) ¹ VC3	+M2		(c) VC1+l	V12		(d) VC1+RFA				(e) VC4+RFA		



¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

/C4+DEA* viittaa mitoitusvhdistolmään \

					DA2			DA2*				(a) ¹ VC4+M1				(b)1 VC3+M2				(c) VC1+	M2			* (d) VC1	VC4+RF +RFA	A* viitta	taa mitoitusyhdistelmään V (e) VC4+RFA		
Perustu Pohjav Maaper Vaakak				6.10	.10a 6.10b		6.10	a	6.10b		8.14a	8.14b		8.1	4a	8.14	lb	8.14	a	8.14b		8.14a	1	8.14	ь	8.14a	8.14b		
s Kulmat	esi Kuiva,	ä Karkear	uorma Rautati	Input & output N_d [kN/m]	Vmax \ 275	Vmin Vr 183	nax Vmii 288	1 Vmax V 183 232	min Vr	nax Vmi 242	n Vma 215	214 Vmin	vma	x Vmin 239 2	Vmax 14 245	Vmin \ 245	Vmax V 279	/min 245	Vmax V 373	min Vı 277	nax Vn 364	nin 277	263 Vmax Vi	min \ 195	/max V 255	/min 195	Vmax Vmir 490	Vmax Vm 552	
ukimuu ri. h = 2	ei Pohiav	akeine n	eliikenn ekuorm	T_d [kN/m]	26	26	102	102 26		102	102	26		104 1	04 24	24	106	106	32	32	122	122	26	26	100	100	26	104	
m	että	taustat	а	e_B,d/B ODF_KK	1.68	2.48	1.01	1.19 1.66		1.01	1.06	2.52	1	.13 1.0	06 2.54	0,03 2.50	1.19	0,10 1.19	1.88	0,03	1.13	0,09	1.85	0,03	1.10	0,15 1.16	1.99	1.59	
		äyttö (Φ' = 38		В	2,00	4,4		1,00	3,7	2)02	_,	2,52	3,4	.,	2,51	5,3	3	2)25	2,00	6,0	1,10	2)20	2,00	4,2	2,20	1,10	2,55	7,9	
		°, γ =		min ODF_KK T. ren [kN/m]	1,01			1,01				1,06			1,19				1,13				1,10				1,59		
		19 kN/m3)		N_rep [kN/m]																									
		siltin näällä		T_rep/N_rep		5.00					1 20	_				C 10			_	5.40			_	5.00		1.20	0.00		
		(su 35		e_B,k/B		5,00		0,03	3	0,14	1,20	4,74 0,04		0,17	.19 0,0	6,48)8		1,45	0,07	5,42 '	_	1,41	0,11	5,30		1,38	0,01	0,03	
		kPa)	Maanti	N_d [kN/m]	152	102	158	102 140		145	130	122		135 1	22 126	126	143	126	189	140	183	140	140	104	134	104	232	260	
			ellikenn ekuorm	T_d [kN/m] e B,d/B	26	26	45	45 26		45	45	26		47	47 24	24 0.08	46	46 0.14	32	32	53	53 0.13	26	26	43	43 0.20	26	47	
			а	ODF_KK	1,42	1,98	1,01	l,14 1,41		1,01	1,05	2,00	1	l,11 1,	05 2,11	2,04	1,20	1,21	1,56	1,94	1,12	1,20	1,50	1,90	1,05	1,03	1,83	1,50	
				B min ODE KK	1.01	2,4	L.	1.01	2,2			1.05	1,9		1.20	2,7	7		1.12	3,0			1.02	2,2	2		1 50	3,7	
				T_rep [kN/m]	1,01			1,01				1,05			1,20				1,12				1,05				1,50		
				N_rep [kN/m]																									
				ODF_LK		2,77		1,60 2,82			1,63	2,70		1,	49	3,35		1,74		2,75		1,66		2,82		1,71	4,68		
				e_B,k/B				0,08	3	0,16		0,10		0,21	0,1	13			0,11				0,16				0,03	0,06	
			EI liikenne	N_d [kN/m] T_d [kN/m]	103 26	69 26	96 24	69 97 24 26		90 24	90 24	97 26		97 97 26	97 81 26 24	81 24	81 24	81 24	122 32	90 32	103 27	90 27	97 26	72 26	82 22	72 22	134 26	134 26	
			kuorma a	e_B,d/B												0,15		0,15		0,16		0,14		0,21		0,18			
			u	ODF_KK B	1,03	1,19	1,14	1,32 1,03	15	1,12	1,12	1,60	15	l,60 1,	50 1,37	1,37 1 7	1,37 7	1,37	1,01	1,03	1,33	1,43	1,04	1,10	1,30	1,37	1,52	1,52 2 1	
				min ODF_KK	1,03	2,0		1,03	1,5			1,60	2,5		1,37	-,,			1,01	2,5			1,04	-,-			1,52	-,-	
				T_rep [kN/m] N_rep [kN/m]																									
				T_rep/N_rep																									
				ODF_LK		1,87		2,02 1,96		0.16	2,11	2,15		2,	15	2,14		2,14	0.13	1,77		2,08	0.16	1,96		2,30	2,70	0.00	
Kulmat	Vedellä	Tiivis	Rautati	N_d [kN/m]	500	333	501	333 401) 	401	371	410		441 4	10 370	370	403	370	549	407	509	407	430	319	398	319	797	860	
ukimuu ri. h = 3	i kyllästy 8 nvt.	moreen i (φ' =	eliikenn ekuorm	T_d [kN/m]	62	62	162	162 62		162	162	62		167 1	67 56	56	167	167	72	72	190	190	59	59	155	155	62	167	
m	pohjav	38 °, γd	а	ODF_KK	8,97	10,20	2,90	1,44 6,01		1,50	1,32	9,77	2	2,13 1,	86 6,45	0,04 6,45	1,21	0,15	5,83	0,04 6,44	1,61	0,14 1,07	7,89	0,05 8,51	1,80	0,18	20,02	11,03 1	
	esi maanpi	= 19 kN/m3,		B		5,0)		4,0				4,1			5,0)			5,5				4,3	3			8,0	
	nnassa	y'=12 kN/m3)		T_rep [kN/m]	1,44			1,32				1,86			1,02				1,07				1,05				11,03		
		,		N_rep [kN/m]																									
				T_rep/N_rep ODF_LK		2.58		1.01 2.67			1.01	2.72		1.	00	3.24		1.08		2.62		1.04		2.85		1.13	5.32		
				e_B,k/B	_			0,05	;	0,16		0,04		0,16	0,0)4		_,	0,03	;			0,04			_,	0,01	0,04	
			Maanti eliikenn	N_d [kN/m] T_d [kN/m]	311 62	207 62	311 86	207 272 86 62		271 86	251 86	252 62		270 2 91 9	52 245 91 56	245 56	266 86	245 86	351	260 72	324 97	260 97	281 59	209 59	260 79	209 79	450 62	484 91	
			ekuorm	e_B,d/B												0,08		0,15		0,09		0,15		0,12		0,19			
			a	ODF_KK B	3,47	2,95 3.1	2,01	1,12 2,42	2.7	1,25	1,14	2,98	2.5	1,29 1,3	13 2,61	2,61	1,22	1,09	2,38	2,17	1,39	1,06	3,15	2,76	1,70	1,18	8,29	5,86	
				min ODF_KK	1,12	-,-		1,14	-,,			1,13	2,5		1,09	5,5	•		1,06	3,5			1,18	2,0	·		5,85	-,-	
				T_rep [kN/m]																									
				T_rep/N_rep																									
				ODF_LK		1,61		l,19 1,81		0.17	1,29	1,67		1,	13	2,15		1,39		1,68		1,31	0.00	1,87		1,46	3,00	0.05	
			Ei	N_d [kN/m]	242	161	224	161 212	,	0,17	196	212		0,20 212 2:	12 186	186	186	186	291	216	248	216	222	164	189	164	311	311	
			liikenne kuorma	T_d [kN/m]	62	62	57	57 62		57	57	62		62	52 56	56	56	56	72	72	61	61	59	59	50	50	62	62	
			a	e_B,d/B ODF_KK	1.69	1.03	1.82	1.28 1.04		1.12	1.12	1.61	1	.61 1.	51 1.10	0,14 1.10	1.10	0,14	1.45	0,13 1.15	1.70	0,11	1.52	0,19	1.79	0,16	3.84	3.84	
				В	,	2,4			2,1	,	í 📘		2,1	,- ,		2,5	5	, -		2,9		/-		2,2	2		.,.	3,1	
				min ODF_KK T rep [kN/m]	1,03			1,04				1,61			1,10				1,15				1,04				3,84		
				N_rep [kN/m]																									
				T_rep/N_rep		1.25		140 142			1 52	1.41		-	11	1.62		1.62		1.20		1 72		1.49		1.92	2.02		
				e_B,k/B		1,23		0,16	5	0,16	1,55	0,16		0,16	0,1	1,03		1,63	0,10)		1,73	0,15	1,48		1,83	0,08	0,08	
Perustu	Pohjav	Maaper	Vaakak	Input & output	Vmax V	Vmin Vr 0a	nax Vmii	N Vmax V	min Vr	max Vmi	n Vma	ax Vmin	vma	x Vmin	Vmax	Vmin V	Vmax V	/min	Vmax V	min Vı	nax Vn	nin	Vmax Vi	min \	/max V	/min	Vmax Vmir	Vmax Vm	
s esi ä uorma Input & outį			πιραι α σατρατ	6.10a 6.10b DA2			6.10	6.10a 6.10b DA2*			8.14a 8.14b (a) ¹ VC4+M1			.1	-a (b) ¹ VC3	8.14 3+M2		8.14a 8.14b (c) VC1+M2				0.146	(d) VC1	8.14 +RFA	5	8.14a 8.14b (e) VC4+RFA			



¹Mitoitustavoista (a) ja (b) epäedullisempi on määräävä.

					I	DA	2	I	DA2	*	(a)	¹ VC4+M1	(b) ¹ VC3+M2			c) VC1+M	2	I	(d) VC1	VC4+RFA* v .+RFA	iittaa mitoitusy e	aa mitoitusyhdistelmään V (e) VC4+RFA		
Perustu	Pohjav	Maaper	Vaakak		6.1	0a	6.10b	6.10	0a	6.10b	8.14a	8.14b	8.14a	8.14	b	8.14a		8.14b	8.	14a	8.14b	8.14a	8.14b		
s Kulmat	esi Vedellä	ä Lövhä	uorma Rautati	Input & output N d [kN/m]	Vmax 738	492	max Vmi 741	in Vmax V	Vmin V	max Vmin 591 54	Vmax Vmin	Vmax Vmin 656 609	Vmax Vmi	n Vmax V	min 510	Vmax Vm 758	in Vma 561	x Vmin 703 56	Vmax	Vmin 444	Vmax Vmin 555 4	Vmax Vmin 44 936	Vmax Vm 1010		
ukimuu	kyllästy	hiekka,	eliikenn	T_d [kN/m]	68	68	192	192 68		192 192	2 68	197 197	60	60 190	190	76	76	216 210	6 65	65	184 1	84 68	197		
ri, h = 3 m	nyt, pohiav	φ' = 32 °. v =	ekuorm a	e_B,d/B										0,02	0,09		0,02	0,0	8	0,03	0,	11			
	esi	16	-	ODF_KK B	5,06	6,30 7 /	2,29	1,68 3,59	5.0	1,40 1,33	3 5,87	2,06 1,95	4,01	4,01 1,16	1,05	3,52	4,13	1,39 1,12	2 4,19	4,83	1,42 1,	05 7,77	4,26		
	maanpi	kN/m3,		min ODF_KK	1,68	/,-	•	1,33	3,5		1,95	0,1	1,05	0,9		1,12	7,0		1,05		,	4,26	5,4		
	lilldssd	kN/m3		T_rep [kN/m]																					
				N_rep [kN/m]																					
				T_rep/N_rep		2.74		1 01 2 92		1.01	2 90	1.01		2 24	1.05		2 72	1.0	1	2 97	1	06 4.49			
				e_B,k/B		2,74		0,0	12	0,09	0,02	0,09	0,02	3,34	1,05	0,02	2,72	1,0.	0	,02	 ,	0,01	0,03		
			Maanti	N_d [kN/m]	430	287	431	287 391		391 362	2 351	377 351	. 333	333 362	333	480	356	444 35	6 391	289	361 2	89 520	559		
			eliikenn ekuorm	T_d [kN/m]	68	68	99	99 68		99 99	68	104 104	60	60 96	96	76	76	107 107	7 65	65	91	91 68	104		
			a	e_B,d/B	2.07	2 10	1 20	1.06 1.70		1 10 1 00	2.07	1 14 1 07	1 07	1.87 1.06	0,09	1.65	0,05	0,09	9	0,07	1 20 1	11 10 2.22	2 27		
				B	2,07	4,3	3	1,00 1,70	3,9	1,10 1,00	2,07	3,5	1,07	4,5	1,01	1,05	4,8	1,14 1,0	2 1,97	3,9	1,29 1,)	10 5,25	5,2		
				min ODF_KK	1,06			1,06	-		1,07	•	1,01			1,02	-		1,10)		2,27			
				T_rep [kN/m]																					
				N_rep [kN/m] T_ren/N_ren																					
				ODF_LK		1,60		1,14 1,88		1,30	1,67	1,10		2,18	1,36		1,72	1,2	9	1,88	1,	41 2,50			
				e_B,k/B				0,0	15	0,09	0,07	0,12	0,05			0,04			0	,05		0,03	0,05		
			Ei liikenne	N_d [kN/m]	341	227	316	227 321		297 297	7 272	272 272	260	260 260	260	391	289	332 289	9 311	231	265 2	31 351	351		
			kuorma	e B.d/B	68	68	63	63 68		63 6:	5 68	68 68	60	0.08	0.08	/6	0.08	65 65	7	0 10	55	09	68		
			а	ODF_KK	1,25	1,07	1,35	1,22 1,08		1,16 1,16	5 1,04	1,04 1,04	1,05	1,05 1,05	1,05	1,07	1,02	L,26 1,2	5 1,17	1,05	1,38 1,	34 1,48	1,48		
				В		3,4	4		3,2			2,7		3,5			3,9			3,:	L		3,5		
				min ODF_KK	1,07			1,08			1,04		1,05			1,02			1,05			1,48			
				N_rep [kN/m]																					
				T_rep/N_rep																					
				ODF_LK		1,27		1,42 1,54		1,67	7 1,25	1,25	5	1,70	1,70		1,40	1,74	4	1,50	1,	85 1,69			
Kulmat	-	Karkear	Rautati	e_B,K/B	329	219	340	219 274	18	0,08	0,11	0,11	0,08	275 309	275	0,06	311	403 31 ⁻	1 29/	,08	282 2	0,07	0,07 567		
ukimuu		akeine	eliikenn	T_d [kN/m]	30	30	105	105 30		105 105	5 30	108 108	27	27 109	109	35	35	125 12	5 28	210	102 1	02 30	108		
ri, h = 2		n taustat	ekuorm	e_B,d/B										0,02	0,09		0,02	0,08	8	0,03	0,	13			
		äyttö	a	ODF_KK	1,52	2,24	1,01	1,33 1,50	2.0	1,00 1,07	7 2,31	1,34 1,41	. 2,26	2,23 1,08	1,07	1,68	2,21	L,04 1,17	7 1,66	5 2,21	1,05 1,	15 1,77	1,41		
		(φ' = 38 ° ··· –		min ODF_KK	1.01	4,	/	1.00	3,9		1.34	3,8	1.07	5,3		1.04	6,0		1.05	4,.	2	1.41	7,3		
		,γ- 19		T_rep [kN/m]																					
		kN/m3,		N_rep [kN/m]																					
		y =12 kN/m3)		ODF LK		2.51		1 02 2 76		1.0	2 2 64	1.01		4.96	1 22		4 12	1.2	1	4.02	1	19 7.01			
		siltin		e_B,k/B		3,31		0,0	13	0,11	0,03	0,12	0,07	4,50	1,23	0,06	7,13	1,2.	0	,10	<u> </u>	0,01	0,03		
		päällä (su = 35	Maanti	N_d [kN/m]	183	122	188	122 169		174 157	7 141	155 141	. 141	141 157	141	211	156	201 150	6 162	120	154 1	20 253	279		
		kPa)	eliikenn ekuorm	T_d [kN/m]	30	30	49	49 30		49 49	30	51 51	. 27	27 49	49	35	35	55 55	5 28	28	45	45 30	51		
			а	ODF_KK	1.32	1.86	1.02	1.27 1.32		1.03 1.09	1.87	1.16 1.15	1.88	1.82 1.06	1.04	1.41	1.75	0,1	1 1.40	0,09	1.08 1.	16 1.64	1.35		
				В		2,6	6	, ,-	2,4	,		1,9		2,7	,-	,	3,0	, ,		2,3	3		3,6		
				min ODF_KK	1,02			1,03			1,15		1,04			1,03			1,08	1		1,35			
				I_rep [KN/m] N rep [kN/m]																					
				T_rep/N_rep																					
				ODF_LK		1,96		1,25 2,33		1,43	3 1,94	1,14		2,54	1,41		2,08	1,38	8	2,23	1,	47 3,48			
			F :	e_B,k/B				0,0	16	0,12	0,09	0,18	0,12			0,10			0	,14		0,03	0,06		
			liikenne	T d [kN/m]	128 30	85 30	118 28	85 114 28 30		28 28	3 30	107 107 30 30	89 27	89 89 27 27	89 27	148	110 35	126 110 30 30	0 114	84 8 28	97 24	34 155 24 30	30		
			kuorma	e_B,d/B										0,15	0,15		0,12	0,1:	1	0,17	0,	15			
			а	ODF_KK	1,05	1,31	1,15	1,40 1,00		1,08 1,08	3 1,43	1,43 1,43	1,14	1,14 1,14	1,14	1,06	1,25	L,36 1,49	9 1,05	5 1,19	1,30 1,	40 1,41	1,41		
				B min ODF KK	1.05	1,8	8	1.00	1,6		1 / 2	1,5	1 14	1,7		1.06	2,1		1.05	1,0	5	1.41	2,2		
				T_rep [kN/m]	1,05			1,00			1,43		1,14			1,00			1,03			1,41			
				N_rep [kN/m]																					
				T_rep/N_rep																					
				e B.k/B		1,37		1,53 1,57	3	0.13	0 1,47	0.15	0.15	1,62	1,62	0.10	1,47	1,8:	1	1,56	1,	<u>33 2,14</u> 0.07	0.07		
Perustu	Pohjav	Maaper	Vaakak	,	Vmax	Vmin V	max Vmi	in Vmax V	Vmin V	max Vmin	Vmax Vmin	Vmax Vmin	Vmax Vmi	n Vmax V	min	Vmax Vm	in Vma	x Vmin	Vmax	Vmin V	/max Vmin	Vmax Vmir	Vmax Vm		
s	esi	ä	uorma	Input & output	6.1	0a	6.10b	6.10	0a	6.10b	8.14a	8.14b	8.14a	8.14	b	8.14a		8.14b	8.	14a	8.14b	8.14a	8.14b		
						DA	2		DA2	*	(a)	' VC4+M1	(6	o)' VC3+M2		(c) VC1+M	2		(d) VC1	+RFA	(e'	VC4+RFA		

