

Angelika Duszyńska

ZBROJENIE GEOSYNTETYCZNE PODSTAWY NASYPU

INŻYNIERIA TRANSPORTOWA



POLITECHNIKA GDAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA

Gdańsk 2016

ISBN 978-83-60261-47-7

Inżynieria transportowa

Redakcja:

Katedra Inżynierii Drogowej
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska

Redakcja naukowa monografii:

dr hab. inż. Wojciech Ślęczka, prof. nadzw. AM

Recenzent:

dr hab. inż. Adam Bolt, prof. nadzw. PG

zdjęcie na okładce:

dr inż. Grzegorz Horodecki

Afiliacja:

Angelika Duszyńska¹

¹Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego

© Copyright by Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Polska

Redaktor prowadzący serii INŻYNIERIA TRANSPORTOWA: dr hab. inż. Joanna Żukowska

WYDANIE I

ISBN 978-83-60261-47-7

Gdańsk 2016

SPIS TREŚCI

1.0	WSTĘP.....	5
2.0	GEOSYNTETYKI.....	8
2.1	Geotekstylia i wyroby pokrewne stosowane do wzmacniania budowli ziemnych	13
2.1.1.	Geotkaniny	13
2.1.2.	Geosiatki (georuszty).....	14
2.1.3.	Geokompozyty	16
2.2.	Geosyntetyki separujące oraz filtrująco-drenujące.....	17
2.3.	Surowce wykorzystywane do produkcji geotekstyliów i wyrobów pokrewnych.....	18
2.4.	Mechanizm działania wzmocnienia geosyntetycznego.....	23
2.4.1.	Zbrojenie geosyntetyczne w konstrukcjach oporowych	24
2.4.2.	Wzmocnienie podstawy nasypu.....	28
2.4.3.	Zbrojenie nadpalowe.....	31
2.4.4.	Stabilizacja podłoża pod obszarem poddanym obciążeniom dynamicznym	34
3.0	PROJEKTOWANIE WZMOCNIENIA PODSTAWY NASYPU WEDŁUG WYTYCZNYCH NIEMIECKICH .	38
3.1.	Zalecane analizy.....	39
3.1.1.	Stateczność ogólna dla kołowych powierzchni poślizgu	39
3.1.2.	Stateczność ogólna dla liniowo zdefiniowanych powierzchni poślizgu	40
3.1.3.	Poślizg.....	42
3.1.4.	Wyparcie.....	47
3.1.5.	Nośność	48
3.1.6.	Dobór geosyntetyku	49
3.1.7.	Analiza wyciągania zbrojenia.....	51
3.2.	Przykład obliczeniowy	53
3.3.	Uwagi do analiz wg EBGeo 2010.....	66
4.0	PROJEKTOWANIE WZMOCNIENIA PODSTAWY NASYPU WEDŁUG NORMY BS 8006:2010.....	68
4.1.	Zalecane analizy stateczności.....	68
4.1.1.	Stateczność lokalna w nasypie (ULS).....	70
4.1.2.	Stateczność na obrót (ULS).....	70

Inżynieria transportowa

4.1.3 Poślizg skarpy po powierzchni zbrojenia (ULS)	74
4.1.4. Wyparcie gruntu spod podstawy (ULS)	75
4.1.5 Nośność podłoża gruntowego (ULS)	78
4.1.6. Stateczność ogólna (ULS).....	79
4.1.7. Nadmierne odkształcenia (wydłużenie) zbrojenia (SLS).....	79
4.1.8. Osiadania nasypu (SLS).....	79
4.1.9. Dobór geosyntetyku	79
4.1.10. Współczynniki częściowe do obliczeń według BS 8006:2010	81
4.2. Przykład obliczeniowy	82
4.3. Uwagi do obliczeń wg BS 8006:2010.....	91
5.0 PORÓWNANIE ZALECEŃ PROJEKTOWYCH	94
5.1. Porównanie wyników obliczeń.....	94
5.2. Stateczność lokalna	98
5.3. Stateczność na obrót (ogólna).....	98
5.4. Stateczność na poślizg	99
5.5. Wyparcie bryły gruntu w podstawie	99
5.6. Nośność podłoża	100
5.7. Dobór zbrojenia.....	100
5.8. Użytkowalność.....	101
6.0 PODSUMOWANIE	103
7.0 BIBLIOGRAFIA	105

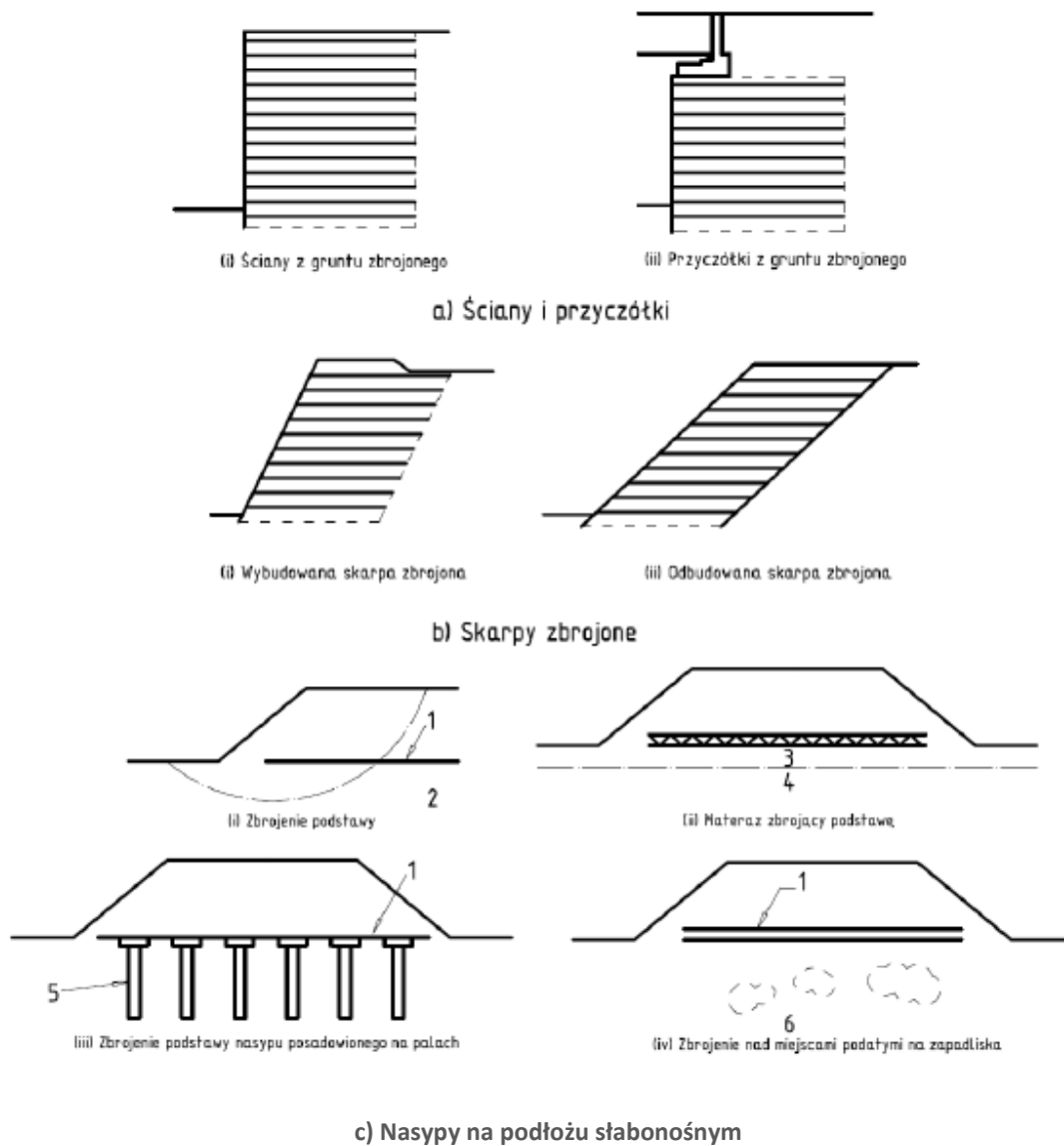
1.0 WSTĘP

Obecnie na rynku dostępnych jest coraz więcej różnych, nowoczesnych polimerowych materiałów budowlanych, do których zalicza się geosyntetyki. Zakres ich stosowania jest bardzo szeroki – obejmuje budownictwo ogólne, drogowe i kolejowe, wodne i morskie, a także inżynierię środowiska.

Wyroby geosyntetyczne znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie ziemnym. Wykorzystane do wzmocnienia słabonośnego podłoża gruntowego pozwalają na przejęcie obciążenia od ruchu pojazdów oraz ciężaru gruntu nasypowego, a także umożliwiają wykonanie ekonomicznej konstrukcji nasypu oraz zabezpieczenie jego skarp. Wyroby geosyntetyczne znajdują zastosowanie: w ścianach oraz przyczółkach z gruntu zbrojonego, w zbrojonych skarpach, jako zbrojenie podstawy nasypu lub geomaterace zbrojące podstawę. Stosowane też są jako zbrojenie nadpalowe przejmujące obciążenie z elementów nośnych takich jak kolumny czy pale, a także zbrojenie nad zapadliskami na terenach szkód górniczych. Wykorzystywane są również do formowania kolumn w osłonach geotekstylnych, jak również zbrojenia poduszek gruntowych np. pod fundamenty bezpośrednio. Typowe zastosowania wzmocnienia geosyntetycznego przedstawiano na rysunku 1.1.

Stosowanie geosyntetyków w budownictwie z biegiem lat znajduje w naszym kraju coraz więcej zwolenników. Niestety obecnie w Polsce brakuje szczegółowych wytycznych pozwalających na bezpieczne projektowanie konstrukcji z zastosowaniem geosyntetyków.

W Polsce brak jest konkretnych norm i wytycznych dotyczących projektowania nasypów na słabym podłożu gruntowym ze wzmocnieniem geosyntetycznym podstawy. W instrukcji ITB nr 429/2007 pt. "Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami" [26], kwestii wymiarowania zbrojenia geosyntetycznego w podstawie nasypu Autorzy poświęcili półtorej (!) strony, sugerując, że "obliczenia należy prowadzić według zasad podanych w normie BS 8006:1995", jednak na zamieszczonych w wytycznych schematach sprawdzania warunków stateczności, zamienili oznaczenia na te stosowane w normatywach niemieckich, co prowadzi do wielu nieporozumień.



1 - element zbrojący, 2 - słabe podłoże gruntowe, 3 - warstwa słaba o małej miąższości, 4 -warstwa nośna, 5 - pale/kolumny, 6 - podłoże ze słabymi strefami

Rysunek 1.1 Zastosowania zbrojenia geosyntetycznego wg BS 8006:2010 [2]

W związku z brakiem zaleceń krajowych, przydatne mogą być wytyczne Niemieckiego Komitetu Geotechniki, czyli zalecenia EBGeo 2010 [14] dotyczące projektowania budowli ziemnych z zastosowaniem geosyntetyków oraz brytyjska norma BS 8006:2010 [2], w której skupiono się na gruncie zbrojonym. Temat ten Autorka podejmowała w swoich wcześniejszych publikacjach, m.in. [8], [9], [10], [12].

Celem niniejszego opracowania jest porównanie wytycznych angielskich i niemieckich pod względem analizowanych mechanizmów zniszczenia konstrukcji, jak i sposobu doboru

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

wzmocnienia geosyntetycznego. Wnioski z przeprowadzonych obliczeń mogą w przyszłości stanowić podstawę propozycji zastosowania wybranych zaleceń w polskim załączniku do EC 7 (PN-EN 1997 „Projektowanie geotechniczne”) [22].

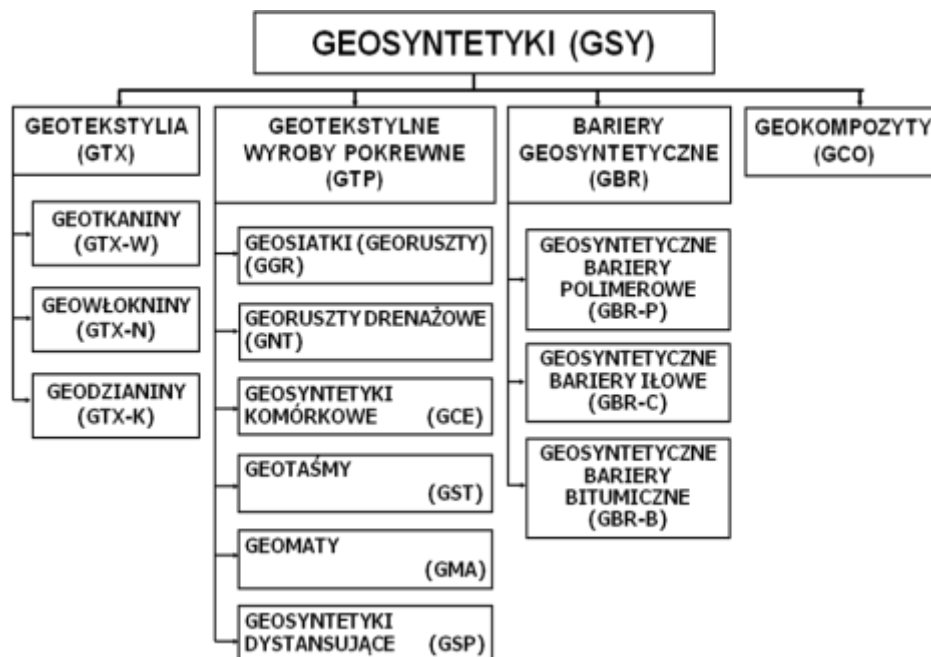
2.0 GEOSYNTETYKI

Pojęciem *geosyntetyk* (Geosynthetic (GSY)) określa się wyrób, którego przynajmniej jeden składnik wytworzony został z polimeru (poliestru, polipropylenu, polietylenu lub poliamidu), mający postać arkusza, paska lub formy przestrzennej, stosowany w kontakcie z gruntem (lub innym materiałem) w geotechnice, fundamentowaniu i budownictwie lądowym i wodnym.

Geosyntetyki w zależności od ich rodzaju mogą pełnić różne funkcje. Do tych podstawowych należą: zbrojenie, rozdzielanie, drenowanie, filtrowanie, ochrona, zabezpieczenia przeciwerozyjne, bariera.

Szczegółowe opisy rodzajów geosyntetyków i ich zastosowań przedstawiono w wielu pozycjach, głównie anglojęzycznych, wśród których na szczególną uwagę zasługują m.in. [17], [20].

W Polsce dla geosyntetyków obowiązuje nomenklatura określona w normie PN-EN ISO 10318:2008 Geosyntetyki – Terminy i definicje [23], szczegółowo omówiona w [8].



Rysunek 2.1 Podział geosyntetyków [8]

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

Podział geosyntetyków, sporządzony na podstawie terminologii ustanowionej w [23] przedstawiono na rysunku 2.1. Podstawową grupę wyrobów geosyntetycznych przepuszczalnych stanowią geotekstylia. *Geotekstylia* (Geotextiles (GTX)), zgodnie z [23], są to płaskie, przepuszczalne, polimerowe (syntetyczne lub naturalne) wyroby tekstylne, które mogą być nietkane, tkane lub dziane, stosowane w kontakcie z gruntem i/lub innymi materiałami w geotechnice i budownictwie. Do grupy tej zalicza się geotkaniny, geowłókniny i geodzianiny.

Geotkanina (Woven geotextile (GTX-W)), zgodnie z [23], jest to wyrób tekstylny, wytworzony z dwóch (lub więcej) układów przędz, włókien ciągłych, taśm lub innych elementów, przeplatanych zwykle pod kątem prostym. Wykonywana jest klasyczną techniką tkacką (osnowa i wątek).

Wyroby te wykorzystywane są wszędzie, gdzie konieczna jest wysoka wytrzymałość wyrobu na rozciąganie a głównie do wzmocnienia i separacji słabego podłoża nasypów komunikacyjnych i wałów. Stosowane są również, jako warstwy rozdzielające między gruntem bądź kruszywem o zróżnicowanym uziarnieniu lub do zbrojenia korpusów zapór ziemnych i wysokich nasypów drogowych.

Geowłóknina (Nonwoven geotextile (GTX-N)), zgodnie z [23], jest to nietkany wyrób tekstylny, wytworzony z losowo rozłożonych włókien ciągłych lub ciętych, łączonych mechanicznie, chemicznie lub termicznie.

Ze względu na technikę wykonania geowłókniny dzielą się na:

- klejone chemicznie - tworzywa te wykonuje się przy użyciu płynnych środków wiążących, środek wiążący łatwo przenika w głąb runa i wypełnia przestrzenie między włóknami wiążąc je między sobą;
- klejone termicznie - włókna w runie łączone są stałymi środkami wiążącymi, a sposób łączenia zależy od rodzaju zastosowanego środka wiążącego, który nadaje geowłókninie ostateczne właściwości, stałe środki wiążące stają się spoiwem, wówczas gdy runo poddane jest odpowiedniemu naciskowi w wysokiej temperaturze;
- łączone mechanicznie – wykonuje się je przez igłowanie i przesywanie.

Podczas mechanicznego formowania runa, poszczególne jego warstwy można układać wzdłużnie, poprzecznie lub krzyżowo, co pozwala na zróżnicowanie właściwości mechanicznych. Parametry geowłóknin są zróżnicowane i należy je dobierać w zależności od zastosowania oraz funkcji, których spełnienia oczekuje się w konkretnym zastosowaniu. Geowłókniny w budowlach ziemnych stosowane są najczęściej w funkcji: separacyjnej, filtracyjnej, drenażowej, ochronnej, przeciwoerozyjnej. W nawierzchniach drogowych mogą pełnić funkcje wzmacniająco-odprężające zapobiegając m.in. spękanom odbitym.

Niezwykle istotne jest by przy doborze i opisie geowłókniny posługiwać się nie tzw. gramaturą (prawidłowa nazwa cechy to masa powierzchniowa) a parametrami istotnymi (znaczącymi) - może to być wodoprzepuszczalność (w płaszczyźnie lub prostopadle do płaszczyzny wyrobu), charakterystyczna wielkość porów lub też wytrzymałość na przebicie (statyczne, dynamiczne), wytrzymałość na rozciąganie (czy też wydłużalność), zależnie od pełnionej przez geowłókninę funkcji w konstrukcji. Wyroby o jednakowej masie powierzchniowej mogą mieć całkowicie różne parametry użytkowe, co związane jest m.in. ze stosowaniem różnych technologii produkcji.

Geodzianina (Knitted geotextile (GTX-K)), zgodnie z [23], jest to wyrób tekstylny powstały w procesie splatania jednej lub wielu nitki przędzy, włókien ciągłych lub innych elementów. Wyroby te tworzone są przez tzw. dzianie nitki uformowanych w łączące się ze sobą oczka w odpowiednim splocie dziewiarskim.

Drugą z grup wyrobów geosyntetycznych, najbardziej obszerną pod względem różnorodności produktów, są wyroby pokrewne geotekstyliom. *Geotekstylny wyrób pokrewny* (Geotextile-related product (GTP)) zgodnie z [23], jest to płaski, przepuszczalny, polimerowy (syntetyczny lub naturalny) wyrób, który nie odpowiada definicji wyrobu geotekstylnego. Do wyrobów pokrewnych zaliczono: geosiatki (georuszty), georuszty drenażowe, geosyntetyki komórkowe, geotaśmy, geomaty i geosyntetyki dystansujące.

Geosiatka (georuszt) (Geogrid (GGR)) jest to płaski wyrób polimerowy stanowiący regularny układ o otwartej strukturze, z trwale połączonych elementów rozciąganych, które mogą być łączone w procesie wytlaczania, spajania lub przeplatania, w którym otwory są większe od elementów nośnych (tzw. żeber).

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

Geosiatki wykonuje się najczęściej z polipropylenu, poliestru lub polietylenu, a także z włókien poliwinylu alkoholowych, szklanych, węglowych, bazaltowych. Węzły geosiatek (miejsca skrzyżowań pasm – żeber) mogą być monolityczne (tego rodzaju siatki są również znane jako georuszty) lub elastyczne. Strukturę rusztu (monolityczne węzły) uzyskuje się poprzez odpowiednie wyłaczanie z arkusza, a następnie wyciąganie (naprężanie) w odpowiednio dobranej temperaturze, dla nadania wyrobowi polimerowemu pożądanych cech wytrzymałościowych. Inną metodą wytwarzania siatek jest termiczne łączenie pasm (zeber) w miejscach ich skrzyżowań. Geosiatki stosuje się w budowlach ziemnych, głównie w funkcji zbrojenia lub stabilizacji.

Georuszt drenażowy (Geonet (GNT)), zgodnie z [23], jest to geosyntetyk składający się z układu równoległych żeber, ułożonego na podobnym układzie żeber, przy czym oba te układy przecinają się pod dowolnym kątem i są ze sobą trwale połączone. Dzięki temu, że żebra w georusztach drenażowych są ułożone w dwóch lub trzech płaszczyznach, możliwy jest transport wody i gazów. Wyroby te rzadko stosowane są samodzielnie. W połączeniu, najczęściej z geowłókninami, stanowią geokompozyty drenażowe. Zdecydowanie nie są to wyroby nadające się do pełnienia funkcji zbrojenia.

Geomata (Geomat (GMA)) zgodnie z [23], jest to wyrób o przestrzennej, przepuszczalnej strukturze, wytworzony z polimerowych jednolitych włókien ciągłych i/lub innych elementów (syntetycznych lub naturalnych), łączonych mechanicznie i/lub termicznie i/lub chemicznie lub w inny sposób. Geomaty przeznaczone są głównie do ochrony skarp (do czasu ukorzenienia się roślinności) przed erozją powierzchniową powodowaną przez wiatr, deszcz i wody płynące oraz wzmacniania systemu korzeniowego roślinności. Stosuje się je również jako elementy kompozytów drenażowych, najczęściej w kombinacjach gdy z jednej, bądź z dwóch stron geomaty występuje geowłóknina.

Geosyntetyk komórkowy (Geocell (GCE)) zgodnie z [23], jest to polimerowy (syntetyczny lub naturalny) wyrób o przestrzennej, przepuszczalnej strukturze w formie plastra miodu lub podobnej strukturze komórkowej, wytworzony z połączonych ze sobą taśm geosyntetyków. W dostępnej literaturze, katalogach producentów, specyfikacjach itp., ta prawidłowa, zgodna z normą, nazwa w ogóle nie funkcjonuje. Tego rodzaju wyroby zwane są geokratami

(to chyba najbardziej popularna nazwa handlowa geosyntetyków komórkowych) czy też geosiatkami komórkowymi. [8]

Geosyntetyki komórkowe stosuje się głównie do umocnienia przeciwoerozyjnego powierzchni stromo nachylonych skarp i zboczy oraz skarp kanałów, cieków i zbiorników. Pełnią również funkcję wzmocnienia słabego podłoża gruntowego szczególnie w konstrukcji dróg tymczasowych w trudnych warunkach gruntowo-wodnych. Czasami wykorzystując tego rodzaju wyroby, konstruuje się podatne konstrukcje oporowe.

Geotaśma (Geostrip (GST)) zgodnie z [23], jest to polimerowy wyrób w formie paska o szerokości nie większej niż 200 mm, stosowany w kontakcie z gruntem i/lub innymi materiałami w geotechnice i budownictwie, natomiast *geosyntetyk dystansujący* (przestrzenny) (Geospacer (GSP)) jest to polimerowy wyrób o przestrzennej strukturze, zaprojektowany w celu wytworzenia w gruncie (lub innym materiale) wolnej przestrzeni, stosowany w geotechnice i budownictwie.

Oddzielną grupę wyrobów geosyntetycznych o bardzo zróżnicowanych właściwościach stanowią geokompozyty. *Geokompozyt* (Geocomposite (GCO)) zgodnie z [23], jest to wyrób łączony w zakładzie produkcyjnym, którego przynajmniej jeden składnik stanowi wyrób geosyntetyczny. Wyroby te mogą być łączone w procesie wiązania, sklejania, zszywania, zgrzewania lub tkania. Mogą być również zbudowane z wykorzystaniem jako rdzenia materiałów mineralnych, np. żwiru. W zależności od struktury geokompozytu mogą one spełniać różne role w budowlach ziemnych, np. rozdzielającą, drenażową, wzmacniającą.

Ostatnią grupę geosyntetyków stanowią bariery czyli wyroby nieprzepuszczalne. W [23] pod nazwą *bariera geosyntetyczna* zdefiniowano wyrób geosyntetyczny o małej przepuszczalności, stosowany w geotechnice i budownictwie, w celu uniemożliwienia lub zmniejszenia swobodnego przepływu płynów lub gazów przez konstrukcję. Wyróżniono trzy rodzaje barier geosyntetycznych: polimerowe (GBR-P), iłowe (GBR-C) i bitumiczne (GBR-B).

2.1 Geotekstylia i wyroby pokrewne stosowane do wzmacniania budowli ziemnych

Mechanizm działania wzmocnienia (zbrojenia) geosyntetycznego jest różny i zależy w głównej mierze od: rodzaju budowli ziemnej (np. konstrukcja oporowa, nasyp), charakteru obciążenia (statyczne, dynamiczne), jak również od sposobu i technologii wykonania posadowienia (bezpośrednio czy na elementach nośnych). Informacje te są kluczowe dla procesu projektowania budowli ziemnej i warunkują prawidłowy dobór wyrobów geosyntetycznych do ich wykonania.

Obecnie w geotechnice w funkcji wzmocnienia najszerszej stosowane są: geotkaniny, geosiatki oraz geokompozyty. Należy pamiętać, że prawidłowe wykonanie każdej budowli ziemnej powinno również uwzględniać zastosowanie odpowiednich wyrobów separujących oraz zapewnić właściwy system filtrująco-drenujący.

2.1.1. Geotkaniny

Geotkaniny stosowane są najczęściej do wzmacniania zbrojonych nasypów komunikacyjnych. Wzmacnia się nimi także górne warstwy podłoża gruntowego nawierzchni drogowych i kolejowych oraz dolne warstwy podbudowy podatnej w celu wydłużenia okresu zakładanej eksploatacji nawierzchni i zredukowania zużycia kosztownych materiałów kamiennych. Dodatkowo geotkaniny mogą pełnić funkcję separacyjną.

Geotkaniny wykonywane są przy zastosowaniu różnych rodzajów splotu; do najczęściej stosowanych należą: splot płócienny, atlasowy i diagonalny. Geotkaniny stosowane w funkcji zbrojącej najlepiej spełniają swoje funkcje, jeżeli przy ich produkcji zastosowany został splot płócienny. W przypadku, gdy istotne są właściwości hydrauliczne wyrobu, z bardzo dobrym rezultatem zastosować można splot diagonalny, cechujący się dużą porowatością.

Do produkcji geotkanin wykorzystywane są różne rodzaje polimerów, które wpływają na właściwości fizyczne i mechaniczne gotowego wyrobu. Najczęściej stosowane są włókna polipropylenowe, polietylenowe i poliestrowe.

Cechą charakteryzującą wszystkie rodzaje geotkanin, niezależnie od zastosowanego rodzaju polimeru czy też splotu, jest ich podatność, która umożliwia układanie ich na nierównym terenie. Ułożenie geotkaniny na podłożu gruntowym jest czynnością łatwą i nie wymagającą skomplikowanych narzędzi. Do rozwinięcia, rozłożenia i przycinania produktu wystarczą

proste maszyny i mały nakład pracy. Ułożona na podłożu geotkanina dostosowuje się do znacznych deformacji gruntu i nie ulega zerwaniu, aż do momentu przekroczenia wartości siły rozciągającej w materiale.

W zależności od wytrzymałości wzdłuż i w poprzek pasma możemy wyróżnić dwie grupy:

- geotkaniny jednokierunkowe – zalecane do stosowania w przypadku ścian oporowych oraz wszelkich konstrukcji, gdzie istnieje ryzyko utraty stateczności skarp, charakteryzujące się większą wytrzymałością w kierunku podłużnym,
- geotkaniny dwukierunkowe – dedykowane konstrukcjom, w przypadku których chcemy uzyskać wzmocnienie podłoża gruntowego na znacznej powierzchni, gdzie przewidywane siły w obydwu kierunkach są do siebie zbliżone.

Niektórzy producenci i dystrybutorzy podają szacunkowe wartości zalecanych parametrów, które należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu zbrojeń geosyntetycznych. Należą do nich:

- wytrzymałość na rozciąganie (szacunkowo od 25 do 1000 kN/m) oraz zredukowana wytrzymałość długoterminowa,
- wodoprzepuszczalność w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyrobu (wskazana minimalna wartość $8 \text{ l/m}^2/\text{s}$, przy czym jeśli geotkanina ma jednocześnie pełnić funkcję separacyjną, zaleca się przyjąć minimum $10 \text{ l/m}^2/\text{s}$),
- odporność na przebicie statyczne CBR (zaleca się minimalną wartość 3,2 kN),
- maksymalne wydłużenie przy największym obciążeniu (z reguły nie więcej niż 10%, przy czym wskazane jest uzależnienie tej wartości od specyfiki projektowanego obiektu).

2.1.2. Geosiatki (georuszty)

Geosiatki stosowane są głównie w funkcji stabilizacyjnej lub, podobnie jak geotkaniny, do wzmocnienia zbrojonych nasypów komunikacyjnych oraz konstrukcji oporowych. Stabilizuje się nimi górne warstwy podłoża gruntowego nawierzchni drogowych i kolejowych oraz dolne warstwy podbudowy podatnej. Przy doborze bardzo istotne jest sprawdzenie wytrzymałości materiału oraz wielkości oczek w odniesieniu do frakcji kruszywa wykorzystanego do współpracy z geosiatką.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

W zależności od charakteru pracy geosiatek możemy wyróżnić (patrz rys. 2.2):

- geosiatki jednokierunkowe – zalecane do zbrojenia gruntu gruboziarnistego w przypadku konstrukcji, w których występują duże siły rozciągające w kierunku podłużnym,
- geosiatki dwukierunkowe – zalecane dla konstrukcji, w których przewidywane siły wewnętrzne w obydwu kierunkach są do siebie zbliżone,
- geosiatki heksagonalne – nowoczesne rozwiązanie oparte na trójkącie równobocznym, wykazujące niemal jednorodne właściwości mechaniczne we wszystkich kierunkach oraz wysoki efekt skrępowania bocznego przy współpracy z kruszywem.



Rysunek 2.2 Geosiatki: a). jednokierunkowa, b). dwukierunkowa, c) heksagonalna

Podobnie jak w przypadku geotkanin, również dla geosiatek producenci podają szacunkowe wartości zalecanych parametrów, które należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu wzmocnienia. Należą do nich:

- wytrzymałość na rozciąganie w kierunku podłużnym (szacunkowo od 20 do 400 kN/m), przy czym na rynku odnaleźć można również wysokowytrzymałe geosiatki aramidowe, których wytrzymałość przekracza 1600 kN/m,
- wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu w kierunku wzdłużnym (do 12%),
- wytrzymałość przy wydłużeniu 2% oraz 5% (równa odpowiednio minimum 15% i 25% wytrzymałości na rozciąganie w kierunku podłużnym),
- wytrzymałość na rozciąganie z uwzględnieniem pełzania (równą według niektórych zaleceń producentów 55% wartości średniej), przy czym warunek ten nie jest istotny w przypadku zbrojenia podstawy nasypów posadowionych na słabych gruntach, gdzie zbrojenie geosyntetyczne pracuje głównie w okresie konsolidacji nasypu,
- wielkość oczek w kierunku wzdłużnym (przyjmuje się minimum 20 mm),
- rodzaj węzłów geosiatki (sztywne/monolityczne lub elastyczne).

W przypadku konieczności zapewnienia funkcji separujących lub/i filtracyjno-drenażowych, geosiatki należy stosować w połączeniu z geowłókninami, ewentualnie geotkaninami.

2.1.3. Geokompozyty

Geokompozyty stanowią oddzielną grupę wyrobów o bardzo zróżnicowanych parametrach i pełnionych funkcjach w kontakcie z gruntem. Ze względu na konstrukcje i funkcje geokompozytów możemy je podzielić na:

- geokompozyty wzmacniające grunty – zbudowane z geowłókniny odpowiadającej za parametry hydrotechniczne, połączonej z elementem wzmacniającym,
- geokompozyty wzmacniające nawierzchnie bitumiczne – umieszczane między warstwami asfaltowymi nawierzchni, których połączenia są oparte o siatkę lub włókna szklane,
- geokompozyty drenażowe i drenażowo-uszczelniające – których rdzeń zespolony jest z geowłókniną filtracyjną lub w przypadku uszczelniających, dodatkowo z geomembraną,
- geokompozyty przeciwoerozyjne – złożone z przestrzennej maty przeciwoerozyjnej oraz wzmacniającej geosiatki.

Geokompozyty wzmacniające (geowłókniny wzmocnione) stosowane są najczęściej do wzmacniania słabego podłoża nasypów komunikacyjnych oraz ochronnych wałów, jak również zbrojonych nasypów i konstrukcji oporowych. Wzmacnia się nimi także górne warstwy podłoża gruntowego nawierzchni drogowych i kolejowych oraz dolne warstwy podbudowy podatnej, w podobnym celu, jak w przypadku geotkanin czy geosiatek. Ponadto, w przeciwieństwie do poprzednich wyrobów, dzięki możliwości odprowadzania wody, pozwalają one na przyspieszenie redukcji parcia wody filtrującej, zwiększenie tarcia, a w rezultacie poprawienie stateczności zbrojonego gruntu. Pełnią zatem również funkcję filtracyjno-drenażową i separacyjną.

Podobnie jak w przypadku geosiatek i geotkanin, ze względu na charakter pracy w konstrukcji, możemy wyróżnić geokompozyty jedno- i dwukierunkowe.

2.2. Geosyntetyki separujące oraz filtrująco-drenujące

Wzmocnienie słabego podłoża gruntowego to nie jedyny problem związany z projektowaniem budowli ziemnych.

Dodatkowo wymagane jest często oddzielenie rodzimego podłoża gruntowego od warstwy konstrukcyjnej lub oddzielenie poszczególnych warstw konstrukcyjnych kruszyw o różnych parametrach, czyli separacja. Funkcję tę mogą spełniać odpowiednio dobrane geowłókniny, geotkaniny i niektóre geokompozyty.

Zdarza się także, że zachodzi konieczność zapewnienia przez geosyntetyk warstwy filtracyjno-drenującej, gdzie najlepiej sprawdzają się: geowłókniny, maty drenażowe i złożone z nich geokompozyty.

Bardzo często warto jest stosować w budowlach ziemnych geosyntetyki pełniące kilka funkcji na raz, w przypadku których istotne jest dobranie wyrobu w odniesieniu do funkcji nadrzędnej. Funkcję separacyjno-filtracyjną w podstawie nasypu lepiej będzie spełniać geowłóknina, jednak jeśli wyrób ma przede wszystkim spełniać funkcję wzmacniająco-separacyjną to bardziej uzasadnione będzie użycie geotkaniny. Aby mieć pewność, że dany wyrób jest odpowiedni do pełnienia funkcji filtracyjnych czy drenażowych należy sprawdzić również kryteria dotyczące właściwości hydraulicznych, czyli: zatrzymywanie cząstek gruntu, przepuszczalność i odporność na kolmatację [8].

Jako warstwy filtracyjne zalecane są cienkie geowłókniny umożliwiające duży przepływ wody i przenikanie najmniejszych frakcji gruntu bez ich zatrzymania między włóknami, czyli zapobiegające zjawisku kolmatacji.

Dobór i opis geowłókniny nie powinien być dokonywany tylko na podstawie jej gramatury (tj. masy powierzchniowej). Szczegółowe zalecenia, opracowane na podstawie niezależnych badań naukowych, dotyczące kryteriów doboru geotekstyliów i wyrobów pokrewnych, których głównym zadaniem ma być pełnienie funkcji filtracyjnych i/lub separacyjnych omówiono m.in. w [3]. Niektórzy producenci podają szacunkowe wartości zalecanych parametrów, które należy wziąć pod uwagę przy ich projektowaniu. Należą do nich:

- charakterystyczna wielkość porów O_{90} (nie mniej niż $90 \mu\text{m}$, przy czym wskazane jest uzależnienie tej wartości od uziarnienia gruntu),
- wodoprzepuszczalność w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyrobu (minimum $90 \text{ l/m}^2/\text{s}$),
- wytrzymałość na rozciąganie (przynajmniej 7 kN/m).

Gdy wymagane jest oddzielenie kruszyw o różnych parametrach, a spodziewane są znaczne odkształcenia separowanych warstw, spowodowane np. dużym osiadaniem gruntu słabonośnego uzasadnione jest stosowanie geowłóknin, które dzięki swojej znacznej wydłużalności pozwolą na znaczne zredukowanie ryzyka uszkodzenia w procesie odkształcania warstw podczas procesu konsolidacji, jak też podczas samego wbudowywania.

Zalecenia są analogiczne jak dla geowłóknin w funkcji filtracyjnej, przy czym równie ważne są w tym przypadku właściwości mechaniczne wyrobu geotekstylnego. Do najważniejszych parametrów projektowych należą zatem:

- wytrzymałość na rozciąganie (szacunkowo od 7 do 30 kN/m),
- wodoprzepuszczalność w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyrobu (zaleca się minimalnie $55 \text{ l/m}^2/\text{s}$),
- wodoprzepuszczalność w płaszczyźnie wyrobu (zaleca się minimalnie $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$),
- odporność na przebicie statyczne CBR (minimalnie 1500 N),
- maksymalne wydłużenie przy ekstremalnym obciążeniu (do 40% , przy czym wskazane jest uzależnienie tej wartości od specyfiki projektowanego obiektu).

2.3. Surowce wykorzystywane do produkcji geotekstyliów i wyrobów pokrewnych

Ze stosunkowo szerokiego wachlarza polimerów, które są obecnie produkowane na skalę przemysłową, do wyrobów geosyntetycznych stosuje się przede wszystkim [25]:

- Polietylen o wysokiej gęstości (HDPE) – giętkie, przezroczyste tworzywo o dobrej odporności na ścieranie i zużycie oraz wysokiej udarności. Cechuje go doskonała odporność chemiczna, niska gęstość w stosunku do innych termoplastów ($0,935 \div 0,970 \text{ g/cm}^3$) oraz temperatura topnienia równa około 130°C . Ponadto charakteryzuje go średnia wytrzymałość mechaniczna, sztywność oraz odporność na pęcznienie, jednak ulega on starzeniu pod wpływem promieniowania UV. Stanowi

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

najczęściej stosowane tworzywo sztuczne do wyrobu geomembran, geosiatek, włókien, folii itp.;

- Polipropylen (PP) – bezbarwne i bezwonne tworzywo o nieco lepszych właściwościach mechanicznych od polietylenu (jest sztywniejsze), przy czym poniżej temperatury 0°C wykazuje znaczny spadek udatności, dlatego wzmacnia się go włóknem szklanym. Cechuje go wysoka odporność chemiczna (jest odporny na roztwory soli, mocne kwasy i zasady) oraz niska gęstość (około 0,92 g/cm³) i temperatura topnienia równa około 160°C. Tworzywo to ulega starzeniu pod wpływem światła i promieniowania UV oraz temperatury. Dodatkowo można go spawać lub zgrzewać. Stosowany jest głównie do wytwarzania geowłóknin i geotkanin;
- Poliester (głównie PET) – tworzywo barwy przezroczystej o bardzo dużej wytrzymałości mechanicznej, sztywności oraz twardości; cechujące się również bardzo dużą odpornością na pęcznienie oraz ścieranie (porównywalna lub wyższa niż dla poliamidów). Jest to tworzywo odporne na oleje, tłuszcze i większość rozpuszczalników, jednakże nie jest odporne na działanie silnych kwasów i zasad. Charakteryzuje go stosunkowo duża gęstość (około 1,37 g/cm³) oraz odporność na wysoką temperaturę, gdyż topnienie zachodzi przy 250°C. Cechuje go też wysoka udatność oraz odporność na działanie promieniowania UV. Stosowany jest głównie do wytwarzania: geotkanin, geowłóknin, rzadziej geosiatek.

W mniejszym zakresie wykorzystywane są również [25]:

- Polichlorek winylu (PVC) – białe tworzywo o znakomitej odporności chemicznej (odporne na działanie kwasów, zasad, alkoholi, benzyny olejów mineralnych tlenu i ozonu), które rozpuszcza się lub pęcznieje pod wpływem działania estrów i ketonów. Charakteryzuje go gęstość między 1,38 a 1,55 g/cm³ oraz niska odporność termiczna wynosząca około 60°C. Cechuje go również duża wytrzymałość mechaniczna oraz odporność na spękania naprężeniowe, a także niewielka odporność na ścieranie. Możliwe jest łatwe spawanie, zgrzewanie oraz klejenie tego materiału. Wykorzystywany jest do wyrobu geomembran, geosiatek, folii itp.;
- Poliamid (PA) – naturalnie białe lub czarne tworzywo charakteryzujące się dużą sztywnością, twardością, trwałością oraz wytrzymałością mechaniczną, a przy tym bardzo elastyczne i posiadające bardzo dobrą odporność na ścieranie. Jego gęstość

waha się od około 1,04 do 1,18 g/cm³ (przy wzmocnieniu włóknami szklanymi dochodzi do 1,60 g/cm³). Wyróżniają go dobre właściwości elektroizolacyjne oraz wysoka zdolność tłumienia drgań, a także odporność na uderzenia. Odporność termiczna tego wyrobu jest zróżnicowana, dla PA 6,6 wynosi najwięcej, około 255°C. Cechuje go także wysoka odporność na promieniowanie UV, dobra odporność chemiczna na oleje, tłuszcze i benzynę oraz dobra obrabialność. Stosowane jeat głównie do wytwarzania geosiatek.

Czasami do wyrobu geosyntetyków (głównie geosiatek) stosowane są również specjalne tworzywa o znacznej sztywności na rozciąganie, małym pęczaniu i dobrej odporności chemicznej, do których należą przykładowo:

- poliwinylalkohol (PVA),
- aramid (A).

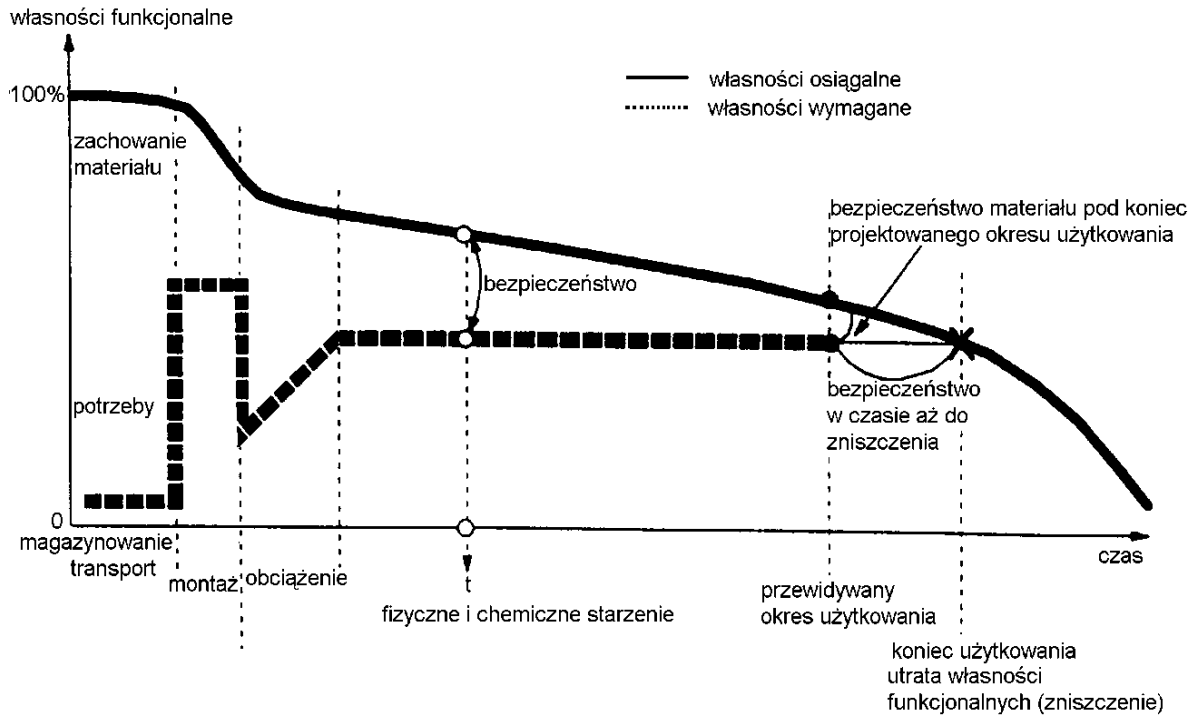
Podstawowym wymogiem stawianym wyrobom geosyntetycznym stosowanym w budowlach ziemnych jest zapewnienie ich właściwej pracy przez minimalny, oczekiwany okres zwany okresem użytkowania, co wiąże się bezpośrednio z koniecznością oceny trwałości zastosowanych geosyntetyków. Ocena trwałości wyrobu powinna zostać przeprowadzona w odniesieniu do tzw. właściwości „znaczących”, mogących różnić się w zależności od zadania, jakie pełnić ma docelowo geosyntetyk (np. funkcja wzmocnienia gruntu lub filtracyjna). Na rysunku 2.3 przedstawiono zmianę właściwości geotekstyliów - osiągalnych i wymaganych (na przykładzie odporności mechanicznej wyrobu, pełniącego funkcję zbrojenia) wraz z upływem czasu, od wyprodukowania materiału do końca jego użytkowania. Na każdym etapie funkcjonowania konstrukcji, projektowana wymagana wytrzymałość geosyntetyku na rozciąganie musi być mniejsza od wytrzymałości osiągalnej.

Analiza trwałości wyrobów geosyntetycznych powinna uwzględniać:

- określenie istotnych czynników środowiskowych,
- wyznaczenie możliwych mechanizmów degradacji, które warunkuje rodzaj zastosowanego polimeru oraz czynniki środowiskowe,
- oszacowanie właściwości wyrobu w funkcji czasu (najczęściej w odniesieniu do wytrzymałości),
- wyznaczenie odpowiednich współczynników redukcyjnych lub właściwości wyrobu pod koniec zakładanego wg projektu okresu użytkowania,

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

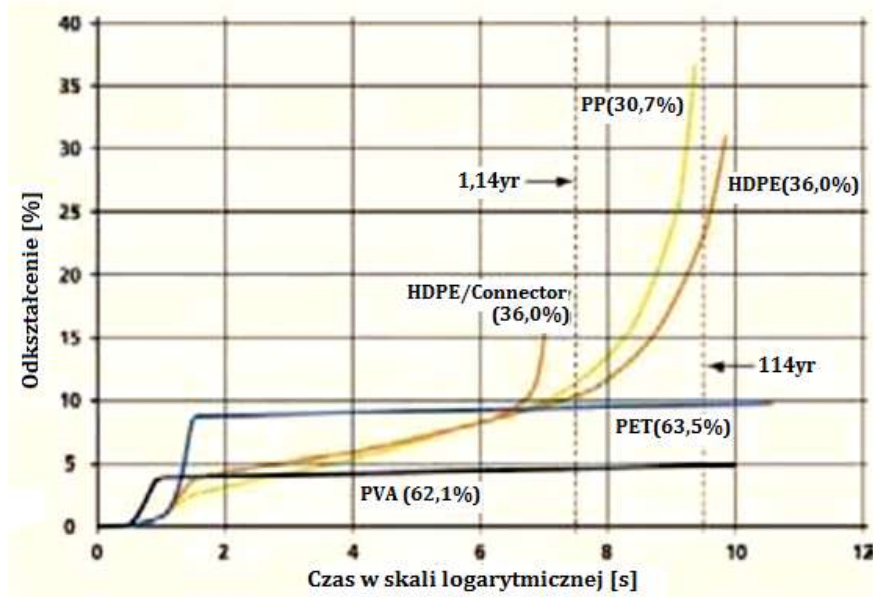
– sprawdzenie czy oszacowane właściwości wyrobu (np. wytrzymałość, wodoprzepuszczalność) są pod koniec projektowanego okresu użytkowania większe od właściwości wymaganych [8].



Rysunek 2.3 Zmiana wytrzymałości geosyntetyku w czasie [7]

W przypadku budowli ziemnych projektowanych na wytrzymałość długoterminową geosyntetyków jednym z najważniejszych czynników, który należy uwzględnić jest pełzanie, czyli zjawisko narastania odkształceń przy stałym obciążeniu, które uzależnione jest od rodzaju polimeru i metody produkcji wyrobu geosyntetycznego.

Jak wynika z rysunku 2.4, wielkość odkształcenia poszczególnych polimerów jest bardzo zróżnicowana. „Płynięcie” wykazują wyroby geosyntetyczne wykonane z surowców takich jak: polipropylen (PP) lub polietylen o wysokiej gęstości (HDPE) przy wyężeniu na poziomie około 30 ÷ 36%, natomiast polimery takie jak: PA, PET, PVA czy aramid (A) charakteryzują się stosunkowo niewielkim pełzaniem, pomimo dwukrotnie większego wykorzystania zbrojenia, w zakresie 50 ÷ 67%.



Rysunek 2.4 Wydłużenie przy pełzaniu geosyntetyków zbrojących, w zależności od polimerów (w nawiasie przedstawiono procentowy stopień wykorzystania zbrojenia) [25]

Właściwości tworzyw polimerycznych wiążą się także z ich odpornością na działanie czynników: atmosferycznych (woda, zmiany temperatury, promieniowanie UV), chemicznych (kwasy, zasady, rozpuszczalniki, sole, materiały pędne, oleje itp.) oraz biologicznych (bakterie, pleśnie, grzyby).

Zasadniczo zalecane jest chronienie tworzyw przed bezpośrednim działaniem promieni słonecznych, które znacznie przyspieszają ich starzenie się. Zjawisku temu zapobiega się poprzez stosowanie dodatków (np. drobno zmielonej sadzy) do surowca wyjściowego, które pozwalają uzyskać dostateczną odporność nawet na długotrwałą ekspozycję.

Wymagania dotyczące właściwości wyrobów geosyntetycznych stosowanych w budownictwie drogowym można odnaleźć w normie PN-EN 13249 [24]. Dostateczna trwałość wbudowywanego geosyntetyku wynosi co najmniej 5 lat w przypadku gdy:

- grunt cechuje pH z zakresu 4÷9,
- temperatura ośrodka nie przekracza 25°C,
- wyrób geosyntetyczny wykonany został z: poliesteru, polietylenu, polipropylenu, poliamidu 6 lub poliamidu 6.6 bez dodatku surowców wtórnych,
- geosyntetyk nie pełni w konstrukcji funkcji zbrojącej.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

Dostateczna trwałość wbudowywanego geosyntetyku wynosi co najmniej 25 lat w przypadku, gdy oprócz powyższych warunków wyrób geosyntetyczny pomyślnie przeszedł dodatkowe badania:

- odporności na hydrolizę (dotyczy: poliestru, poliamidu 6 i 6.6),
- odporności na utlenianie (dotyczy: polipropylenu, polietylenu, poliamidu 6 i 6.6).

W szczególnych przypadkach, gdy:

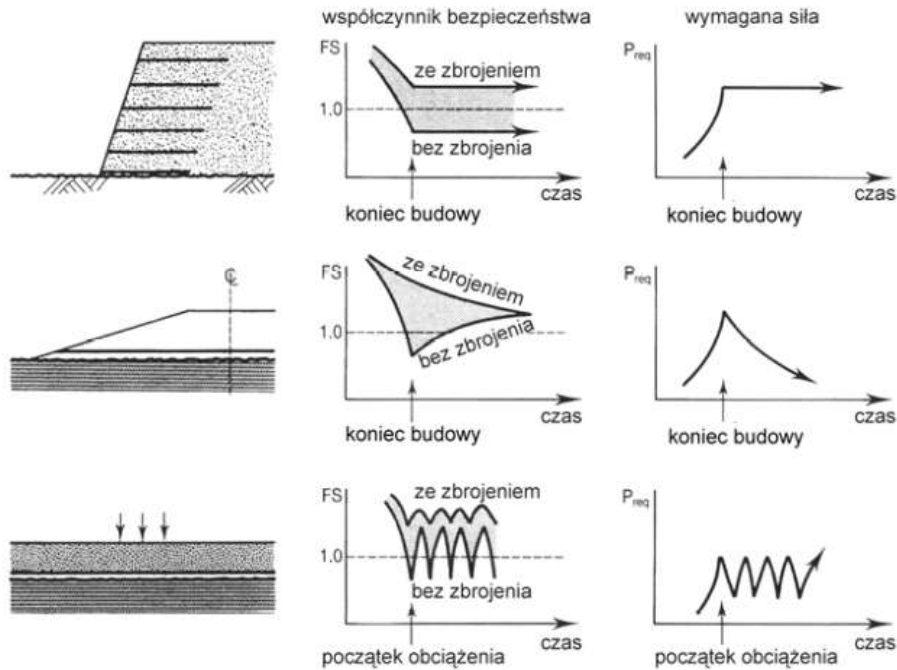
- okres eksploatacji przekracza 25 lat,
- temperatura podłoża gruntowego przekracza 25°C,
- mamy do czynienia z gruntami zanieczyszczonymi (szczególnie solami amonowymi),
- środowisko, w którym chcemy zastosować wyroby geosyntetyczne charakteryzuje wysoka kwasowość lub zasadowość,
- geosyntetyki wyprodukowane zostały z różnych polimerów oraz kompozytów, co uniemożliwia standardowe badanie odporności na hydrolizę i utlenianie,
- wiemy, że w skład wyrobów geosyntetycznych wchodzi surowce wtórne,

trwałość wyrobów geosyntetycznych należy określać odnosząc się do lokalnych warunków użytkowania oraz dodatkowo uwzględnić badania odporności na wpływy mikrobiologiczne.

2.4. Mechanizm działania wzmocnienia geosyntetycznego

Istotnym elementem projektowania budowli z zastosowaniem wyrobów geosyntetycznych w funkcji wzmocnienia jest umiejętność dostrzeżenia różnic w pracy geosyntetyku w zależności od rodzaju konstrukcji.

W konstrukcjach oporowych wzmocnienie geosyntetyczne musi zapewnić stateczność konstrukcji przez cały okres jej eksploatacji, natomiast w przypadku nasypów na słabym podłożu zbrojenie geosyntetyczne jest stosowane przede wszystkim w celu zwiększenia stateczności w tzw. krytycznym okresie wykonywania konstrukcji i podczas późniejszej konsolidacji podłoża gruntowego. W związku z tym po wzroście wytrzymałości podłoża gruntowego, w wielu przypadkach zbrojenie geosyntetyczne może nie być już potrzebne do zapewnienia stateczności konstrukcji.



Rysunek 2.5 Różnice w pracy geosyntetyku w przypadku konstrukcji oporowej, nasypu na słabym podłożu i konstrukcji drogi [8]

W przypadku konstrukcji oporowych, gdy wymagana siła przenoszona przez zbrojenie musi być utrzymywana na jednakowym poziomie przez cały okres użytkowania konstrukcji, istotnym elementem przy doborze geosyntetyku jest zwrócenie uwagi na charakterystykę wyrobu pod względem pełzania. Dla nasypów na słabym podłożu, właściwości długoterminowe wyrobów geosyntetycznych nie są tak istotne ze względu na fakt, że maksymalna siła przenoszona przez zbrojenie wymagana jest krótkoterminowo – w czasie budowy nasypu i w czasie konsolidacji podłoża. Całkowicie odmiennie sytuacja przedstawia się w przypadku wzmocnienia konstrukcji drogi, gdzie głównym obciążeniem jest obciążenie powtarzalne. Zasadniczym kryterium przy doborze wyrobu geosyntetycznego do takiego zastosowania jest „odpowiedź” geosyntetyku na obciążenia cykliczne. Na rysunku 2.5 przedstawiono różnice w pracy geosyntetyku w zależności od rodzaju omawianej konstrukcji.

2.4.1. Zbrojenie geosyntetyczne w konstrukcjach oporowych

W przypadku konstrukcji oporowych zbrojenie geosyntetyczne stosuje się w celu zwiększenia wytrzymałości gruntu i możliwości zastosowania bardziej stromych skarp niż jest to możliwe w naturze. Zbrojenie geosyntetyczne stosowane jest do przejścia naprężeń rozciągających

lub ścinających, redukuje obciążenia mogące wywołać zniszczenie gruntu przez ścięcie lub nadmierne deformacje.

Głównym obciążeniem konstrukcji oporowych jest obciążenie ściskające, powodujące powstawanie naprężeń rozciągających wewnątrz gruntu. Po wprowadzeniu kilku warstw zbrojenia geosyntetycznego następuje redukcja wartości zarówno odkształceń pionowych jak i poziomych, spowodowana wewnętrznym oddziaływaniem pomiędzy gruntem, a zbrojeniem. Ponieważ sztywność zbrojenia na rozciąganie jest znacznie większa niż w przypadku gruntu, to poziome przemieszczenia gruntu względem zbrojenia nastąpią, gdy grunt będzie miał możliwość „przesunięcia się” względem zbrojenia. Z kolei gdy powierzchnia zbrojenia będzie dostatecznie szorstka, to zostaną wygenerowane naprężenia ścinające na powierzchni styku warstwy gruntu i zbrojenia, wywołujące naprężenia rozciągające w zbrojeniu. Zastosowanie warstw zbrojenia geosyntetycznego nie tylko zmniejsza wartości odkształceń, ale także wpływa na poprawę wytrzymałości gruntu.

Generalnie, w przypadku gruntu niezbrojonego, zniszczenie następuje po przekroczeniu jego wytrzymałości na ścinanie. W gruncie, który poddawany jest stałemu obciążeniu bocznemu i wzrastającemu obciążeniu pionowemu, powstają wzrastające naprężenia ścinające, aż do momentu zniszczenia. W przypadku gruntu zbrojonego do zniszczenia potrzebna jest zdecydowanie większa wartość obciążenia ściskającego, wpływającego na wzrost naprężeń ścinających.

Dobór odpowiednich materiałów wykorzystanych w charakterze zbrojenia i gruntu zasypowego jest równie ważny, co parametry ich wzajemnej współpracy. Dzięki wzajemnemu oddziaływaniu zasyпки i zbrojenia uzyskiwane jest mechaniczne polepszenie parametrów gruntu, co pozwala na przenoszenie odpowiednio większych obciążeń, niż w przypadku gruntu niezbrojonego.

Zastosowanie elementów zbrojących, układanych na przemian z warstwami kruszywa/gruntu wpływa na wprowadzenie w konstrukcji dodatkowej siły utrzymującej, która pełni dwojaką funkcję:

- obniża wartość siły ścinającej, którą przenieść musi sam grunt zasypowy,
- zwiększa wytrzymałość na ścinanie gruntu, poprzez dodatkową składową normalną na potencjalnej płaszczyźnie zniszczenia.[7]

W przypadku konstrukcji oporowych w ramach analizy stateczności wewnętrznej należy sprawdzić dwa podstawowe warunki, które powinny być spełnione w trakcie całego projektowanego okresu eksploatacji konstrukcji:

- warunek wyciągnięcia zbrojenia z konstrukcji na skutek przekroczenia oporów kotwienia lub poślizgu po zbrojeniu,
- warunek zerwania zbrojenia w wyniku wystąpienia siły niszczącej większej od jego wytrzymałości na rozciąganie.

W takich konstrukcjach jak mury oporowe, obciążenie może zostać przejęte przez zbrojenie w tzw. strefie aktywnej, znajdującej się w bliskiej odległości od lica ściany. Aby zachować stateczność wewnętrzną takiej konstrukcji, znaczna część obciążenia powinna zostać przeniesiona przez zbrojenie w strefie pasywnej. W tym celu należy dobrać wzmocnienie geosyntetyczne o odpowiedniej długości, sztywności i szorstkości.

W konstrukcjach z gruntu zbrojonego, oprócz właściwości samego gruntu i materiału zbrojenia, bardzo istotne są parametry ich wzajemnego oddziaływania. Ideą zbrojenia gruntu jest silne oddziaływanie pomiędzy gruntem a zbrojeniem (w tym przypadku geosyntetykiem) w płaszczyźnie ich wzajemnego styku. Interakcja ta powstaje na skutek występowania naprężeń pionowych, pochodzących od ciężaru gruntu spoczywającego powyżej warstwy zbrojenia. Podstawowymi badaniami modelującymi mechanizmy współpracy gruntu i zbrojenia geosyntetycznego są badania:

- bezpośredniego ścinania, w którym blok gruntu ślizga się po warstwie zbrojenia;
- wyciągania, w którym materiał zbrojenia jest wyciągany z gruntu.

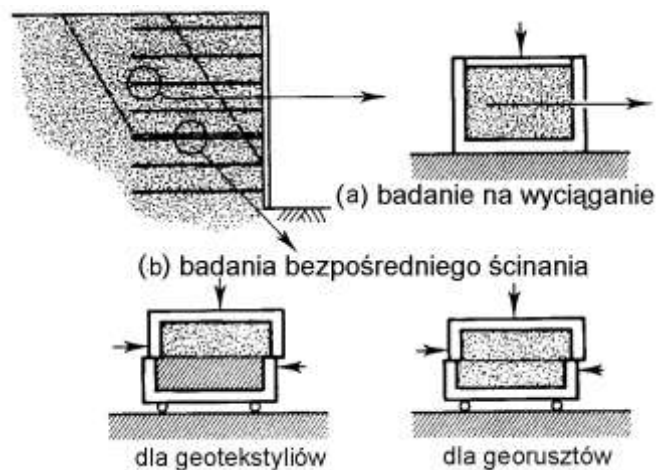
Zmodyfikowane badania bezpośredniego ścinania są odpowiednie do pomiaru współczynnika bezpośredniego poślizgu między gruntem a dowolnym materiałem zbrojącym (rys. 2.6b). W przypadku geotkanin i geowłóknin bezpośredni poślizg występuje między materiałem geotekstylnym a znajdującym się nad nim gruntem, na całej powierzchni kontaktu. Badania bezpośredniego ścinania są względnie proste do przeprowadzenia, między innymi ze względu na powszechność tego rodzaju aparatów w laboratoriach geotechnicznych.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

Badanie na wyciąganie („pullout test”) (rys. 2.6a) modelujące drugi sposób wzajemnego oddziaływania - rozwój przyczepności - jest znacznie trudniejsze w interpretacji, a do jego przeprowadzenia niezbędny jest specjalny aparat.

W odniesieniu do geotekstyliów i geowłóknin, mechanizm przyczepności po obu stronach zbrojenia jest bardzo podobny do tego, który występuje przy bezpośrednim ścinaniu. Współczynnik przyczepności otrzymany z badań na wyciąganie tych materiałów często pokrywa się ze współczynnikiem bezpośredniego poślizgu, pomierzonym w zmodyfikowanych badaniach bezpośredniego ścinania.

W przypadku georusztów, geosiatek i kompozytów złożonych z tych materiałów, sposób wzajemnego oddziaływania podczas wyciągania różni się od oddziaływania podczas bezpośredniego ścinania. Wyniki badań wyciągania wykazują, że w przypadku tych materiałów rozwój przyczepności odbywa się częściowo na skutek koncentracji naprężeń na poprzecznych żebrach georusztu (odpór), podczas gdy rozwój wytrzymałości na bezpośredni poślizg odbywa się częściowo przez ścinanie gruntu po gruncie w oczkach rusztu, a częściowo przez ścinanie gruntu po płaskich poziomych powierzchniach georusztu. [7]



Rys. 2.6. Wzajemne oddziaływanie gruntu i zbrojenia [7]

Realna wartość współczynnika przyczepności dla geosiatki lub rusztu może być więc określona jedynie w badaniu na wyciąganie. Zwykle na etapie projektowania, w przypadku braku danych z badań, do celów projektowych zaleca się przyjmować bardzo zachowawcze wartości współczynników związanych ze współpracą grunt-zbrojenia geosyntetyczne, na

poziome 50% wartości tangensa kąta tarcia wewnętrznego gruntu zasypowego (np. EBGEO 2010 [14]).

Konstrukcje z gruntu zbrojonego poddawane są stałemu obciążeniu, w całym okresie użytkowania budowli, które w konsekwencji działa również na geosyntezyki zbrojące (rys. 2.6). W przypadku gdy wymagane jest utrzymywanie stałej siły w zbrojeniu przez długi okres, tak jak w przypadku skarp, na wybór zbrojenia istotny wpływ ma charakterystyka pełzania materiału zbrojącego, które omówiono w paragrafie 2.3.

Oprócz sprawdzenia warunków związanych ze statecznością wewnętrzną, w przypadku konstrukcji oporowych należy również dokonać analizy stateczności zewnętrznej. Do tych warunków należą:

- stateczność na przesunięcie – poślizg (dotyczący całej bryły gruntu zbrojonego),
- stateczność na obrót,
- nośność podłoża pod konstrukcją,
- stateczność ogólna.

W przypadku analizy potencjalnych powierzchni zniszczenia oczywistym jest, że przecinane przez nie warstwy zbrojenia geosyntetycznego zwiększają wytrzymałość masywu gruntowego na ścinanie i poprawiają ogólną stateczność konstrukcji.

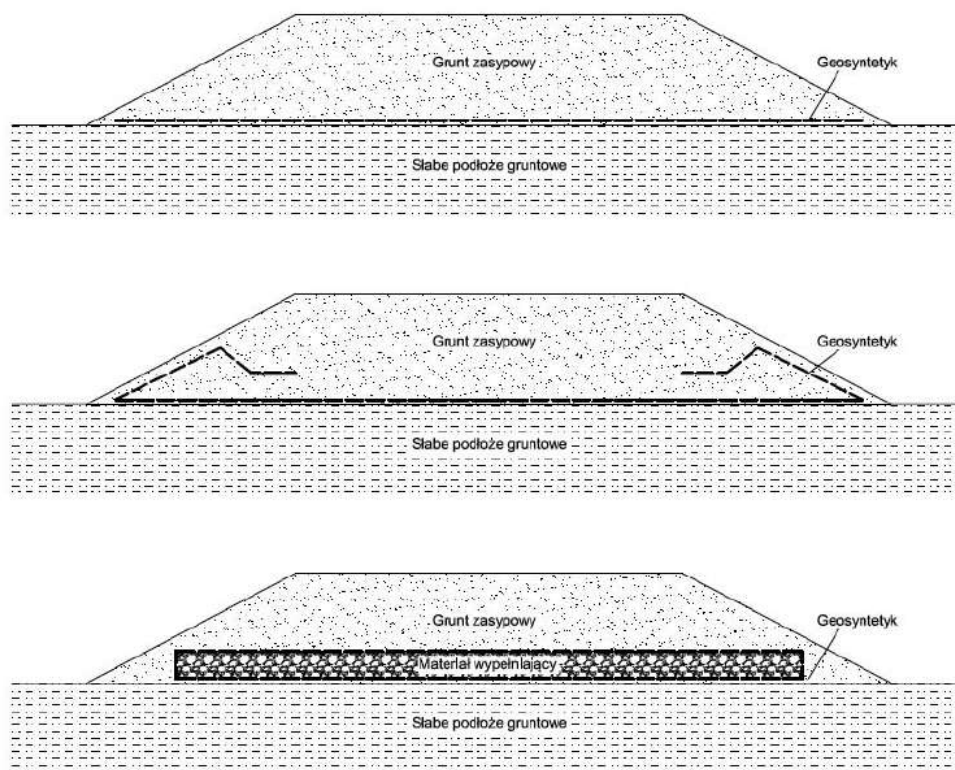
2.4.2. Wzmocnienie podstawy nasypu

Zbrojenie podstawy nasypu posadowionego na słabonośnym podłożu gruntowym wykonuje się w celu uniknięcia: nadmiernych odkształceń i utraty stateczności konstrukcji. Wyroby geosyntetyczne układane w podstawie nasypu nie tylko wspomagają stateczność ogólną konstrukcji w trakcie budowy, ale także przyczyniają się do lepszego - równomiernego rozkładu nacisków na podłoże gruntowe. Różne rozwiązania technologiczne wzmocnienia podstawy nasypu przedstawiono na rysunku 2.7. [9]

Wyroby geosyntetyczne, umieszczane w podstawie nasypu na styku gruntu budującego nasyp i gruntu podłoża, pełnią nie tylko funkcję wzmacniającą, ale również funkcję separującą – zapobiegają mieszanemu się materiału gruntowego. Z kolei zbrojenie podstawy nasypu wykonywane z charakterystycznym zawinięciem służy jego lepszemu zakotwieniu i wpływa przede wszystkim na poprawę współczynnika bezpieczeństwa związanego

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

z poślizgiem konstrukcji. Połączenie wyrobu geotekstylnego z kruszywem – stworzenie tzw. materaca, sprzyja równomiernemu rozkładowi nacisku i może pełnić również funkcję drenującą. Zastosowanie zbrojenia geotekstylnego w podstawie nasypu tylko w niewielkim stopniu wpływa na ograniczenie osiadań. Bardziej skutecznym rozwiązaniem w tej kwestii jest połączenie zbrojenia w podstawie nasypu z inną technologią, np. palami czy kolumnami tłuczniowymi. Wówczas warstwa geotekstylna „rozkłada” obciążenie nasypem na pionowe elementy nośne. W celu przyspieszenia osiadań można zastosować połączenie wzmocnienia geosyntetycznego np. z geodrenami. W takim przypadku zbrojenie geotekstylne wpływa na równomierność tych osiadań.



Rysunek 2.7 Różne rozwiązania technologiczne wzmocnienia podstawy nasypu [9]

Jak już wspomniano zbrojenie geosyntetyczne w podstawie nasypu w największym stopniu wpływa na stateczność konstrukcji. Wraz z upływem czasu, w skutek konsolidacji podłoża następuje wzrost wytrzymałości słabonośnego gruntu do tego stopnia, że zastosowane zbrojenie w podstawie nasypu może przestać być konieczne do zapewnienia stateczności konstrukcji.

W przypadku nasypu niezbrojonego, zniszczenie może nastąpić w wyniku „rozejścia się” konstrukcji i podłoża gruntowego na boki. Zastosowanie poziomej warstwy zbrojenia geosyntetycznego lub materaca w podstawie nasypu jest skutecznym rozwiązaniem dla tego mechanizmu zniszczenia. Zniszczenie poprzez boczne wyparcie gruntu słabonośnego może zostać powstrzymane dzięki wbudowaniu poziomej warstwy zbrojenia geosyntetycznego pomiędzy nasypem, a podłożem gruntowym. Jeżeli zastosowane zbrojenie będzie cechować odpowiednia szorstkość i wytrzymałość na rozciąganie, to naprężenia ścinające powstałe w podstawie nasypu zostaną przejęte przez zbrojenie geosyntetyczne dzięki zjawisku tarcia pomiędzy zbrojeniem, a gruntem i tym samym w zbrojeniu geosyntetycznym powstaną naprężenia rozciągające. Dzięki temu zostaną ograniczone poziome deformacje podstawy nasypu, a także zredukowane boczne wypieranie gruntu spod nasypu oraz zostanie zachowana nośność podłoża gruntowego.

Istotnym przypadkiem mechanizmu pracy wzmocnienia geosyntetycznego w konstrukcji nasypu jest sytuacja, gdy słabonośne podłoże gruntowe ma ograniczoną miąższość, a pod nim zalega warstwa gruntu nośnego. Wówczas boczne przemieszczenia nasypu i słabonośnego podłoża są krytycznymi mechanizmami zniszczenia. W sytuacjach gdy takie podłoże ma dużą miąższość, należy dodatkowo wziąć pod uwagę głębokie powierzchnie poślizgu. Korzystnym rozwiązaniem w takim przypadku jest zastosowanie zbrojenia materacem geosyntetycznym, który powoduje zmianę kształtu powierzchni poślizgu. Dodatkowo zbrojenie geosyntetyczne przejmujące naprężenia rozciągające powoduje wzrost momentu utrzymującego, wpływając tym samym na poprawę stateczności konstrukcji.

Aby wzmocnienie geosyntetyczne prawidłowo pełniło swoje funkcje oraz mogło przejąć naprężenia i odkształcenia, konieczne jest zapewnienie odpowiedniej współpracy między zbrojeniem, a gruntem. Mechanizm ich współdziałania zależy m.in. od: charakterystyki gruntu nasypu i podłoża, a także od charakterystyki zbrojenia oraz zależności między nimi. Generalnie, tak jak w przypadku konstrukcji oporowych, należy rozpatryć dwa stany graniczne: nośności i użytkowości. W ramach stanu granicznego nośności zniszczenie może nastąpić poprzez zerwanie zbrojenia lub zniszczenie kontaktu między gruntem, a zbrojeniem. W przypadku stanu granicznego użytkowości należy sprawdzić osiadania konstrukcji oraz odkształcenia zbrojenia i porównać je z wielkościami dopuszczalnymi.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

W przypadku gruntów niespoistych efektywna współpraca gruntu ze zbrojeniem zależy od:

- tarcia, które jest zależne od gruntu,
- rodzaju zbrojenia i szorstkości jego powierzchni.

Dla gruntów niespoistych bardzo korzystnym mechanizmem współpracy ze zbrojeniem geosyntetycznym jest tzw. zazębianie się cząstek gruntu w otworach, np. siatki zbrojeniowej.

W przypadku gruntów spoistych wzajemne oddziaływanie ze zbrojeniem jest zależne dodatkowo od adhezji, na którą mają wpływ również właściwości gruntu, np. wartość wytrzymałości na ścinanie oraz właściwości zbrojenia, np. szorstkość jego powierzchni.

Generalnie przyjmuje się, że zbrojenie geosyntetyczne przenosi osiowe naprężenia rozciągające i nie współpracuje z gruntem poprzez zginanie czy ścinanie w płaszczyźnie jego przekroju. Dla zapewnienia stateczności wewnętrznej nasypów wzmocnionych w podstawie, tak jak w przypadku konstrukcji oporowych, konieczne jest określenie sił rozciągających w zbrojeniu w strefie aktywnej i przeniesienie ich na zbrojenie w strefie pasywnej. Ten zabieg projektowy zapewnia, że zostaną spełnione warunki stanu granicznego nośności i użyteczności konstrukcji. Jednakże przeniesienie naprężeń i odkształceń do strefy pasywnej wiązać się może nie tylko z powstaniem osiowych sił rozciągających, ale dodatkowo z powstaniem efektów zginania i ścinania w zbrojeniu.

2.4.3. Zbrojenie nadpalowe

W przypadku podłoża o bardzo małej wytrzymałości i dużych obciążeniach, skutecznym rozwiązaniem jest posadowienie nasypu na kolumnach lub palach, z zastosowaniem nadpalowego zbrojenia geosyntetycznego, [15], [10]. W takim układzie fundamentowym konstrukcję nasypu z gruntu zbrojonego można traktować jako kompozyt posadowiony na pionowych elementach nośnych. Nośność całej konstrukcji zwiększa się proporcjonalnie do udziału pól zajmowanych przez kolumny w stosunku do całkowitego pola podstawy nasypu.

Podstawową funkcją zbrojenia nadpalowego jest równomierne przekazanie obciążeń na nośny grunt za pośrednictwem pionowych elementów nośnych tj. pali lub kolumn, które stanowią sztywne podparcie dla nasypu zbrojonego. Drugorzędną funkcją jest uniknięcie efektów przebicia. Oprócz tego, wzmocnienie geotekstylne w podstawie nasypu spełnia zadanie łącznika – „mostu” pomiędzy elementami nośnymi. Dzięki wykorzystaniu efektu

membrany słabonośny grunt jest całkowicie lub w znacznej części odciążony. Zależy to głównie od sztywności pali lub kolumn i zbrojonego gruntu. Oddziaływania na zbrojenie geosyntetyczne pomiędzy elementami nośnymi są redukowane ze względu na występowanie efektu sklepienia, jak i reakcji gruntu poniżej wzmocnienia. Reakcja gruntu podłoża rośnie wraz ze wzrostem wydłużenia zbrojenia i tym samym zmniejsza obciążenie działające na wzmocnienie geosyntetyczne. Relacja wydłużenia zbrojenia i odpowiedzi gruntu zależy od sztywności zbrojenia oraz sztywności gruntu podłoża.

Wzmocnienie podstawy nasypu przy użyciu pionowych elementów nośnych można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą będą punktowe elementy nośne, a do drugiej liniowe elementy nośne. W przypadku tych pierwszych istnieją dwa zasadnicze rozwiązania technologiczne dotyczące wzmocnienia geosyntetycznego:

- jedna lub dwie warstwy zbrojenia dwukierunkowego,
- dwie warstwy zbrojenia jednokierunkowego w układzie prostopadłym.

Dla liniowych elementów nośnych można zastosować z kolei jedno- lub dwuwarstwowe zbrojenie dwukierunkowe w poprzek płaszczyzny podparcia. Przy zastosowaniu dwóch warstw zbrojenia należy oddzielić je warstwą kruszywa o odpowiedniej miąższości.

Skuteczność działania zastosowanego układu konstrukcja nasypu – zbrojenie geosyntetyczne – pionowe elementy nośne zależy od takich czynników jak:

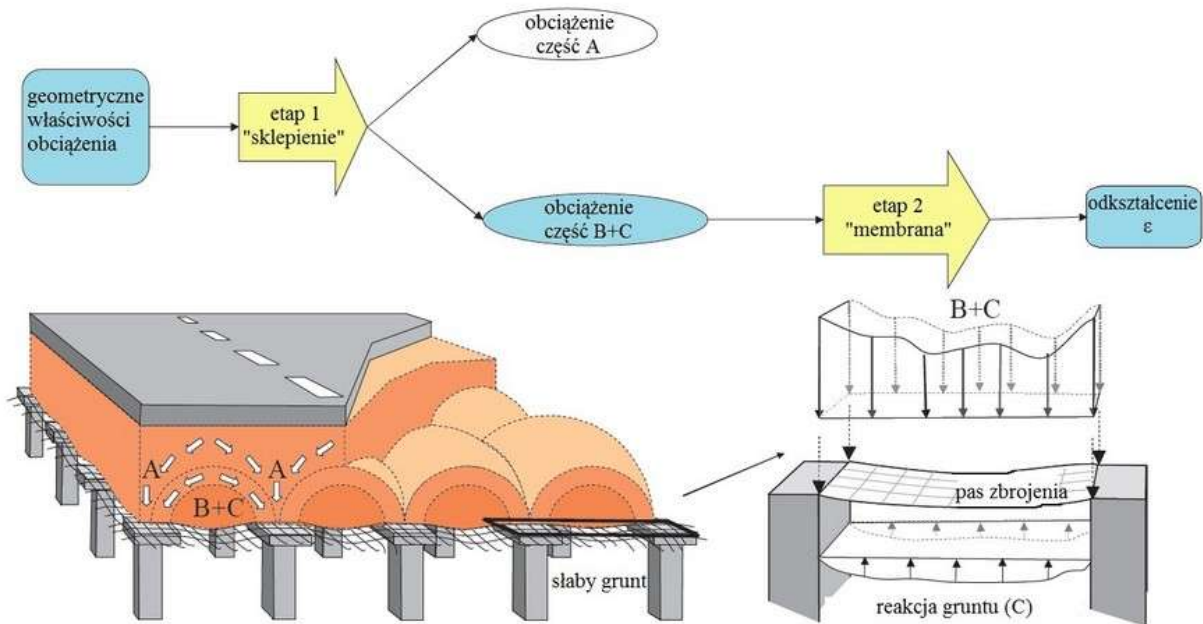
- rozstaw elementów nośnych i ich układ,
- wysokość nasypu,
- odległość płaszczyzny zbrojenia od podstawy nasypu,
- stosunek średnicy elementów nośnych do ich rozstawu,
- osiowa sztywność i wytrzymałość zbrojenia na rozciąganie,
- wytrzymałość na ścinanie gruntu nasypu,
- wpływ obciążeń cyklicznych,
- wpływ struktury wyrobów geosyntetycznych i liczby warstw zbrojenia.

Mechanizm działania zbrojenia nadpalowego jest związany z czterema podstawowymi oddziaływaniami występującymi w konstrukcji:

- obciążenia pionowe pomiędzy elementami nośnymi,

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

- obciążenia pionowe na elementach nośnych (strefa kontaktu gruntu zbrojonego z podparciem),
- siły ścinające i siły rozłożone w nasypie,
- siły rozciągające w zbrojeniu geosyntetycznym.



Rysunek 2.8 Efekt „sklepienia” i „membrany” [10]

Dwoma najbardziej istotnymi efektami wpływającymi na sposób działania wzmocnienia geosyntetycznego w podstawie nasypu posadowionego na pionowych elementach nośnych są efekty: sklepienia i membrany przedstawione na rysunku 2.8.

Efekt sklepienia gruntu dotyczy rozkładu obciążeń w konstrukcji z gruntu zbrojonego, posadowionej na pionowych elementach nośnych. Polega on na przyjęciu założenia, że pomiędzy elementami nośnymi wytwarza się pewnego rodzaju sklepienie gruntowe, powodujące przejście znacznie większej wartości naprężeń przez pionowe elementy nośne.

Redystrybucja obciążeń w podstawie nasypu ściśle związana jest z faktem, że pale i otaczający grunt wykazują znaczne różnice w charakterystyce odkształceń. Efekt przesklepienia gruntu pomiędzy sąsiednimi „czapkami” pali powoduje, że większa część naprężeń zostaje przekazana na pale. Rozkład naprężeń zależy od rozstawu pali, czyli od długości zbrojenia pomiędzy sąsiednimi „czapkami” oraz od ich rozmiaru.

Drugi z efektów - efekt membrany związany jest z: obciążeniami przekazywanymi na powierzchnię zbrojenia pomiędzy elementami nośnymi, czyli elementami podparcia zbrojenia (część B+C na rysunku 2.8) i odciążeniem spowodowanym reakcją gruntu w tej strefie (część C na rysunku 2.8). Siła „odpowiedzi” gruntu wzrasta wraz z ugięciem zbrojenia, powodując zmniejszenie obciążenia działającego na zbrojenie. Ponadto efekt membrany zakłada, że naprężenia pionowe działające na podłoże gruntowe ulegają zmniejszeniu, przede wszystkim w skutek mobilizacji naprężenia poziomego spowodowanego, „naciąganiem” geosyntetyku. Uzyskanie tego efektu wymaga znacznego odkształcenia warstwy geosyntetycznej powodującego wydłużenie zbrojenia i powstanie w nim sił rozciągających. Dzięki efektowi membrany oraz sztywności elementów nośnych i sztywności zbrojenia geosyntetycznego słabonośne podłoże zostaje w dużym stopniu odciążone, a obciążenie przeniesione na pale lub kolumny za pośrednictwem zbrojenia geosyntetycznego. Omawiany mechanizm ma zastosowanie jedynie w przypadku geosyntetyków wiotkich, czyli głównie geowłóknin i geotkanin, w których mobilizacja zbrojenia następuje w skutek tarcia, a nie tak jak ma to miejsce w przypadku georusztów w skutek zaziębienia się kruszywa w oczkach.

W przypadku nasypów zbrojonych geosyntetykami w podstawie i posadowionych na pionowych elementach nośnych, należy standardowo dokonać analiz stanu granicznego nośności dla zbrojenia geosyntetycznego, ale także sprawdzić nośność elementów pionowych. Oprócz tego konieczne jest przeprowadzenie analizy stateczności i sprawdzenie stanu granicznego użytkowalności, obejmującego określenie odkształceń zbrojenia, pionowych elementów nośnych i podłoża.

2.4.4. Stabilizacja podłoża pod obszarem poddanym obciążeniom dynamicznym

Generalnie w przypadkach konstrukcji drogowych, poddawanych obciążeniu cyklicznemu, funkcja stabilizująca wyrobu geosyntetycznego polega na uniemożliwieniu ruchu zaklinowanych cząstek gruntu w oczkach zastosowanego wyrobu ażurowego. Ze względów praktycznych najczęściej w takich przypadkach stosuje się georuszty. Skuteczność efektu stabilizacji związana jest ze sztywnością zastosowanego wyrobu w strefie kontaktu z gruntem, a nie z wytrzymałością na rozciąganie wyrobu, jak to ma miejsce w przypadku klasycznej funkcji zbrojenia. Celem stabilizacji warstwy jest uzyskanie zwiększonej

odporności na deformację. Stabilizacja konstrukcji poddawanych obciążeniu dynamicznemu dotyczy:

- podłoża: dróg, linii kolejowych, pasów startowych,
- platform roboczych,
- podstaw nasypów formowanych na słabonośnych podłożach,
- zabezpieczeń na terenach górniczych i sejsmicznych.

Najczęstszym przypadkiem zastosowania geosyntetyku w funkcji stabilizacji jest podbudowa drogowa z kruszywa. Mechanizm pracy geosyntetyku polega na przejściu obciążeń cyklicznych bez powstania nadmiernych odkształceń warstwy kruszywa czy uszkodzeń geosyntetyku.

Obciążenie pionowe działające na podbudowę powoduje poziomy ruch ziaren kruszywa. Bez stabilizującej warstwy geosyntetyku te deformacje byłyby nieodwracalne. Obciążenia powtarzalne spowodowałyby akumulację przemieszczeń. Zadaniem warstwy geosyntetycznej jest uniemożliwienie przemieszczeń ziaren kruszywa i przejście naprężeń poziomych, powstających na styku warstwy kruszywa i podłoża słabonośnego. Aby wyrób geosyntetyczny odpowiednio pełnił funkcję stabilizującą konieczne jest by charakteryzował się dobrą „przyczepnością” z kruszywem i szybką „reakcją” przy niewielkich odkształceniach.

Przyczepność geosyntetyku i warstwy kruszywa zależy przede wszystkim od rodzaju wyrobu. W przypadku geotekstyliów czyli geotkanin i geowłóknina na właściwość tę mają wpływ siły tarcia między wyrobem a kruszywem, które zależą z kolei od technologii produkcji wyrobu, szorstkości jego powierzchni i uziarnienia kruszywa. W przypadku georusztów dochodzi do mechanicznego zazębienia ziaren kruszywa w oczkach. Skuteczność tego mechanizmu zależy od kształtu i rozmiaru oczek, uziarnienia kruszywa, a także od sztywności wyrobu. Oprócz tego istotnym aspektem działania wyrobu w funkcji stabilizującej jest jego szybka „odpowiedź” na przemieszczenia ziaren kruszywa. Jeżeli mobilizacja działania geosyntetyku następuje przy niewielkich odkształceniach to praca wyrobu jest bardziej efektywna. Ze względu na skuteczność mechanizmu zazębienia – natychmiastową reakcją geosyntetyku na działające obciążenie, stosowanie wyrobów ażurowych w funkcji stabilizującej jest o wiele bardziej korzystne niż stosowanie geotekstyliów. [19]

Obciążenia zmienne działające na omawiane konstrukcje wiążą się z głównie z technologią robót ziemnych. Największe oddziaływania na zbrojenie geosyntetyczne przekazywane są podczas zagęszczania warstwy kruszywa ułożonej na wyrobie. Obciążenia drogowe charakteryzują się impulsowym i krótkotrwałym oddziaływaniem cyklicznym. Wpływ polimeru, z którego wykonany został georuszt jest znaczący; jego lepkością charakter powoduje, że deformacje zbrojenia poddanego działaniu obciążeń cyklicznych nie są trwałe.

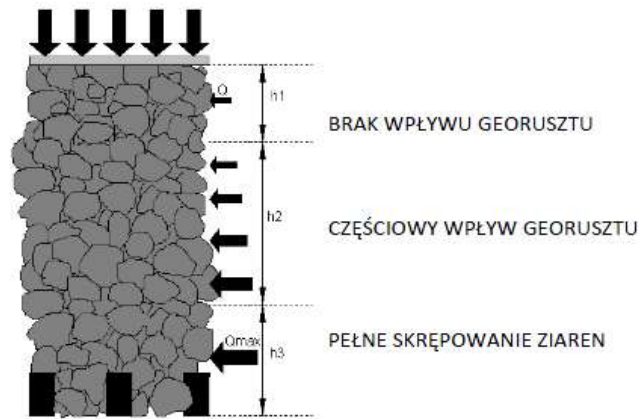
Zasadniczym mechanizmem działania geosyntetyku w funkcji stabilizującej jest polepszenie odporności warstwy na ścinanie. Polega to na przeniesieniu potencjalnej powierzchni ścicia ze słabonośnego podłoża na warstwę kruszywa. Dzięki zastosowaniu zbrojenia ażurowego, tak jak już wcześniej wspomniano, dochodzi do bocznego skrępowania kruszywa w oczkach georusztu, czyli tzw. efektu zazębienia. Sztywność georusztu decyduje o braku odkształcalności ziaren kruszywa. Aby zbrojenie współpracowało w odpowiedni sposób z kruszywem, konieczne jest wzbudzenie stanu naprężenia w kruszywie, które w przypadku efektu zazębienia mobilizuje się natychmiastowo po przyłożeniu obciążenia.

Efekt zazębienia, czyli klinowanie się ziaren kruszywa w oczkach geosyntetyku, może również „występować w geosiatkach wiotkich. Jednakże do pełnego skrępowania bocznego, działającego efektywnie, konieczna jest odpowiednia sztywność wyrobu geosyntetycznego. Działanie efektu zazębienia opiera się na założeniu, że już w początkowej fazie obciążenia nie wystąpią odkształcenia. Można to uzyskać dzięki odpowiedniemu zagęszczeniu ziaren kruszywa w oczkach geosyntetyku i w przypadku dużej sztywności wyrobu.

Skrępowanie boczne ziaren kruszywa uniemożliwia ich poziome przemieszczenia, ale także ogranicza ich ruchy pionowe. Efekt zazębienia maleje wraz ze wzrostem odległości od poziomu ułożenia zbrojenia (rys. 2.9):

- strefa pełnego skrępowania – mikroskopijne przemieszczenia ziaren, pełna odporność ziaren na przemieszczenia,
- strefa pośrednia - zmienna zdolność ziaren do przemieszczeń,
- strefa braku skrępowania – przemieszczenia wynikające z naturalnego oporu tarcia kruszywa.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu



Rysunek 2.9 Strefy „efektu zazębienia” [19]

Zaleca się aby strefa skrępowania i strefa pośrednia miały jak największą miąższość, a kruszywo było odpowiednio dobrane, to znaczy w taki sposób, by jego uziarnienie pozwalało na właściwe zazębienie w oczkach georusztu. [19].

3.0 PROJEKTOWANIE WZMOCNIENIA PODSTAWY NASYPU WEDŁUG WYTYCZNYCH NIEMIECKICH

W analizie konstrukcji z gruntu zbrojonego geosyntetykiem, zgodnie z zaleceniami EBEGO 2010 [14], należy sprawdzić warunki stanu granicznego nośności (ULS) i stanu granicznego użyteczności (SLS).

Analizy stanu granicznego użyteczności przeprowadza się stosując charakterystyczne wartości oddziaływań i oporów według normy DIN 1054. Jeżeli spełnione zostały warunki stanu granicznego nośności, to w poniższych przypadkach analizy stanu granicznego użyteczności (SLS) można pominąć:

- konstrukcje zaliczane do kategorii geotechnicznej GC1,
- konstrukcje oporowe z obciążeniem użytkowym $p_k \leq 10 \text{ kN/m}^2$ na dużych powierzchniach należących do GC2 oraz ze współczynnikiem wykorzystania $\mu \leq 0,75$ w stanie granicznym GEO,
- konstrukcje, dla których można wykorzystać szczegółowe dane z podobnych obiektów, w których zastosowano tę samą metodę projektowania, w podobnych warunkach gruntowych.

Analizy obliczeniowe stanu granicznego nośności (ULS) przeprowadza się na tzw. wartościach projektowych, czyli z uwzględnieniem cząstkowych współczynników bezpieczeństwa. Termin ten jest tożsamy z wartością obliczeniową, definiowaną przez EC 7 [22]. Wartości projektowe oddziaływań określonych w trakcie analiz porównuje się z projektowymi wartościami oporów (wytrzymałości).

Przy projektowaniu zbrojenia geosyntetykiem wbudowanym w strefę kontaktu nasypu z podłożem rodzimym należy przeanalizować stateczność początkową i końcową, a także na poszczególnych etapach wykonywania konstrukcji nasypu. Jeżeli obliczona stateczność jest niewystarczająca, to zbrojenie zapewnia dodatkowe siły oporu w stanie równowagi. Jeżeli stateczność w stanie docelowym jest wystarczająca bez uwzględnienia zbrojenia, to jego okres użytkowania odpowiada okresowi konsolidacji podłoża gruntowego. Jeżeli jednak

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

stateczność niezbrojonego nasypu nie będzie zapewniona, to należy zaprojektować zbrojenie na okres użytkowania nasypu.

Tabela 3.1 Przyporządkowanie konstrukcji z gruntu zbrojonego do odpowiednich kategorii geotechnicznych (GC)

Konstrukcja	Kategoria geotechniczna 1 (GC1)	Kategoria geotechniczna 2 (GC2)	Kategoria geotechniczna 3 (GC3)
Konstrukcje oporowe	$H < 3 \text{ m}$	$3 \text{ m} \leq H < 9 \text{ m}$	$H \geq 9 \text{ m}$
Przyczółki mostowe	-	$H < 2 \text{ m}$	
Nasypy	$H < 3 \text{ m}$	$3 \text{ m} \leq H < 9 \text{ m}$	$H \geq 9 \text{ m}$
Stabilizacja zapadlisk	-	-	stabilizacja zapadlisk
Płyty fundamentowe	$5 \text{ cm} \leq s_{\text{allow}} \leq 10 \text{ cm}$	$2 \text{ cm} \leq s_{\text{allow}} < 5 \text{ cm}$	$1 \text{ cm} \leq s_{\text{allow}} < 2 \text{ cm}$
Specjalne konstrukcje z gruntu zbrojonego	-	System fundamentowy wykorzystujący kolumny wykonane w osłonach z geosyntetyku	
	-	Zbrojone konstrukcje ziemne nad punktowymi lub linowymi elementami nośnymi (np. nasyp z geosyntetykiem w podstawie posadowiony na palach)	

3.1. Zalecane analizy

3.1.1. Stateczność ogólna dla kołowych powierzchni poślizgu

Analizę stateczności ogólnej dla kołowych powierzchni poślizgu należy przeprowadzić zgodnie z normą DIN 4084 [6] dla stanu granicznego nośności podłoża (GEO) i w oparciu o współczynniki przedstawione w tabeli 3.2. Sprawdzenie warunku stateczności ogólnej można wykonać przy użyciu programów komputerowych wykorzystujących tzw. „metody paskowe”.

Tabela 3.2 Częściowe współczynniki bezpieczeństwa – stan GEO [14]

współczynnik	wartość
γ_G	1,0
γ_Q	1,3
γ_φ	1,25
γ_{Cu}	1,25
$\gamma_{c'}$	1,25
γ_γ	1,0
γ_{Gr}	1,0

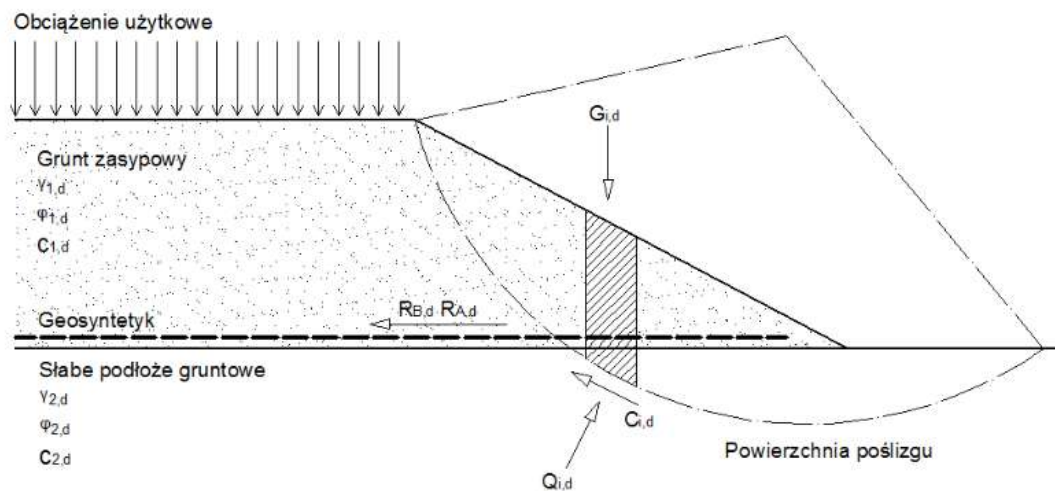
Wyróżnia się dwa stany konstrukcji: początkowy i końcowy. W przypadku stanu początkowego (budowlanego) uwzględnia się parametry geotechniczne słabego podłoża w warunkach braku odpływu, natomiast w przypadku stanu końcowego (użytkowego) z odpływem (parametry efektywne).

Warunek stateczności ogólnej dotyczy sprawdzenia krytycznych powierzchni poślizgu:

- zlokalizowanych wewnątrz nasypu i nieprzecinających warstwy zbrojenia,
- zlokalizowanych wewnątrz nasypu i przecinających warstwy zbrojenia,
- przecinających nasyp, słabe podłoże gruntowe i warstwy zbrojenia (rys. 3.1).

Opór zbrojenia przyjmuje się jako oddziaływanie utrzymujące. Konstrukcję uważa się za bezpieczną, jeżeli oddziaływania destabilizujące są nie większe niż oddziaływania utrzymujące:

$$E_d \leq R_d + \min(R_{B,d}; R_{AL,d}; R_{AR,d}; R_{O,d}) \quad (3.1)$$

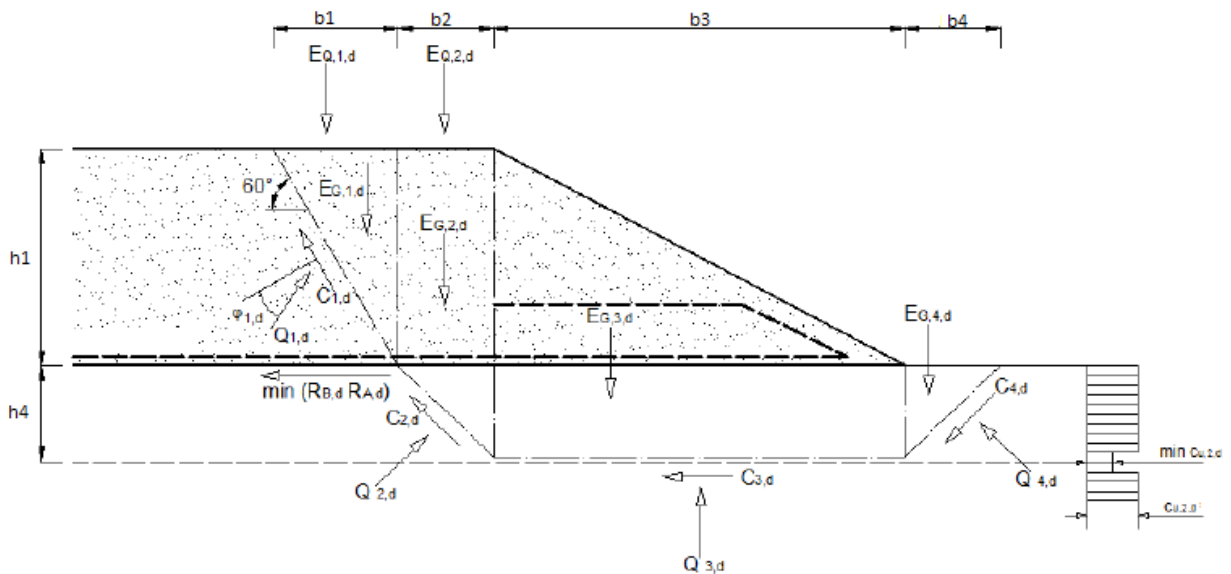


Rysunek 3.1 Stateczność ogólna – schemat [14]

3.1.2. Stateczność ogólna dla liniowo zdefiniowanych powierzchni poślizgu

W przypadku geologicznie określonych powierzchni poślizgu, stateczność ogólną należy sprawdzić nie tylko dla kołowych powierzchni poślizgu, ale także dla liniowo zdefiniowanych, zgodnie z rysunkiem 3.2, w stanie granicznym nośności podłoża (GEO), jedynie dla początkowego stanu konstrukcji.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu



Rysunek 3.2 Stateczność ogólna dla liniowo zdefiniowanych powierzchni poślizgu [14]

Kąt zniszczenia w podłożu gruntowym w warunkach bez odpływu należy przyjmować równy 45° , a kąt zniszczenia w nasypie zależny od kąta tarcia wewnętrznego materiału nasypu równy $45^\circ + (\phi'_{1,d}/2)$.

Oddziaływania od ciężaru objętościowego gruntu:

$$E_{G,1,d} = 0,5 \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot \gamma_G$$

$$E_{G,2,d} = b_2 \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot \gamma_G + 0,5 \cdot b_2 \cdot h_4 \cdot \gamma_{2,k} \cdot \gamma_G$$

$$E_{G,3,d} = 0,5 \cdot b_3 \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot \gamma_G + b_3 \cdot h_4 \cdot \gamma_{2,k} \cdot \gamma_G$$

$$E_{G,4,d} = 0,5 \cdot b_4 \cdot h_4 \cdot \gamma_{2,k} \cdot \gamma_G$$

Oddziaływania od obciążenia użytkowego:

$$E_{Q,1,d} = b_1 \cdot q_k \cdot \gamma_Q$$

$$E_{Q,2,d} = b_2 \cdot q_k \cdot \gamma_Q$$

Siły spójności:

$$C_{1,d} = 0$$

$$C_{2,d} = l_2 \cdot c_{u,2,d}$$

$$C_{3,d} = l_3 \cdot c_{u,2,min,d}$$

$$C_{4,d} = l_4 \cdot c_{u,2,d}$$

Poziome siły dla każdego analizowanego klina:

$$H_{1,d} = (E_{G,1,d} + E_{Q,1,d}) \cdot \frac{\sin(45^\circ - \frac{\varphi'_{1,d}}{2})}{\sin(45^\circ + \frac{\varphi'_{1,d}}{2})}$$

$$H_{2,d} = E_{G,2,d} + E_{Q,2,d} - 2 \cdot C_{2,d} \cdot 2^{-0,5}$$

$$H_{3,d} = -C_{3,d}$$

$$H_{4,d} = -E_{G,4,d} - 2 \cdot C_{4,d} \cdot 2^{-0,5}$$

Wypadkowa siła pozioma:

$$H = H_{1,d} + H_{2,d} + H_{3,d} + H_{4,d}$$

Aby warunek stateczności był spełniony, projektowa wytrzymałość geosyntetyku $R_{B,d}$ i wartość oporu geosyntetyku na wyciąganie $R_{A,d}$ muszą wynosić co najmniej tyle, co wypadkowa siła pozioma H .

3.1.3. Poślizg

Stateczność na poślizg rozpatrywana jest dla stanu początkowego i końcowego konstrukcji. Powierzchnia poślizgu może utworzyć się pomiędzy geosyntetykiem a gruntem zasypowym lub pomiędzy geosyntetykiem a gruntem rodzimym w podłożu.

W przypadku gdy siła tarcia jest zbyt mała, stateczność na poślizg może być powiększona przez "zawinięcie" geosyntetyku w nasyp. Stąd w wytycznych EBGeo [14] podano dwa warianty sprawdzania stateczności konstrukcji na poślizg, w zależności czy zastosowano zbrojenie z zawinięciem, czy bez.

I. Sprawdzenie stateczności na poślizg konstrukcji ze zbrojeniem geosyntetycznym bez zawinięcia wiąże się z określeniem czy spełnione są poniższe warunki:

1) poślizg w nasypie po górnej powierzchni geosyntetyku

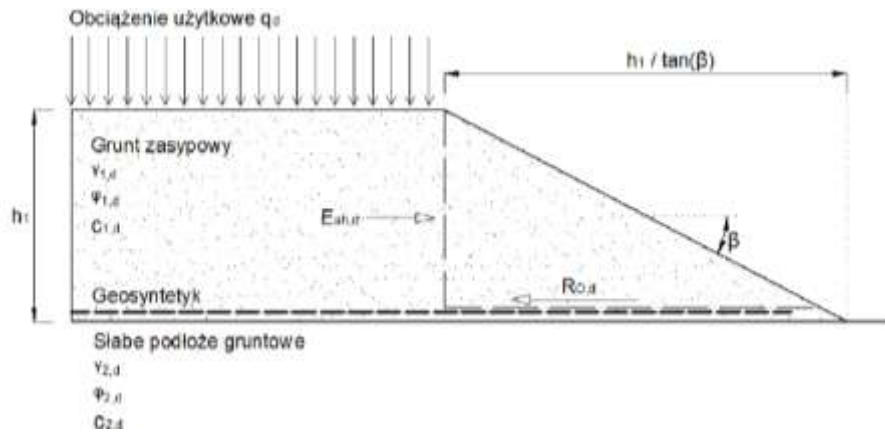
$$E_{ah,d} \leq R_{O,d} \tag{3.2}$$

gdzie:

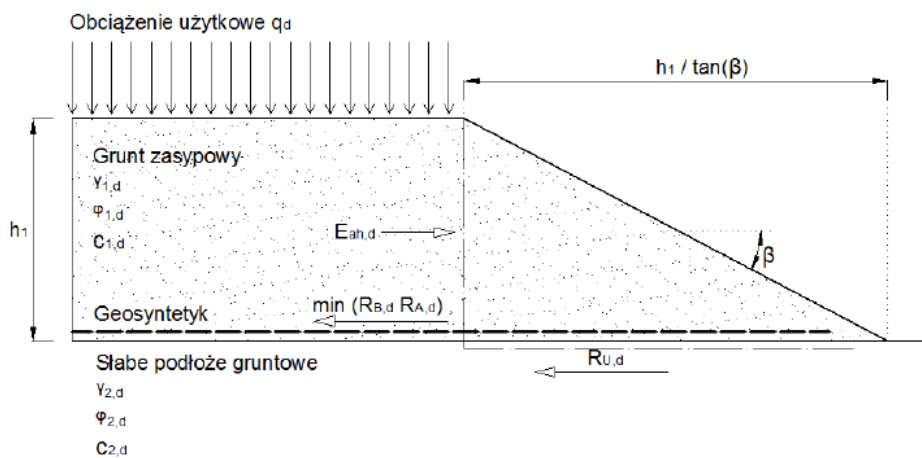
$E_{ah,d}$ - projektowa wartość składowej poziomej parcia czynnego,

$R_{O,d}$ - projektowa wartość oporu tarcia pomiędzy górną powierzchnią geosyntetyku a gruntem zasypowym.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu



Rysunek 3.3 Poślizg konstrukcji bez zawinięcia zbrojenia – warunek 1 [14]



Rysunek 3.4 Poślizg konstrukcji bez zawinięcia zbrojenia – warunek 2 [14]

2) poślizg w podłożu po dolnej powierzchni geosyntetyku

$$E_{ah,d} \leq R_{U,d} + \min(R_{B,d}, R_{A,d}) \quad (3.3)$$

gdzie:

$R_{U,d}$ - projektowa wartość oporu tarcia pomiędzy dolną powierzchnią geosyntetyku a gruntem podłoża,

$R_{B,d}$ - projektowa wartość wytrzymałości zbrojenia (STR),

$R_{A,d}$ - projektowa wartość oporu na wyciąganie zbrojenia (GEO).

II. Sprawdzenie stateczności na poślizg konstrukcji ze zbrojeniem geosyntetycznym z zawinięciem dotyczy warunków:

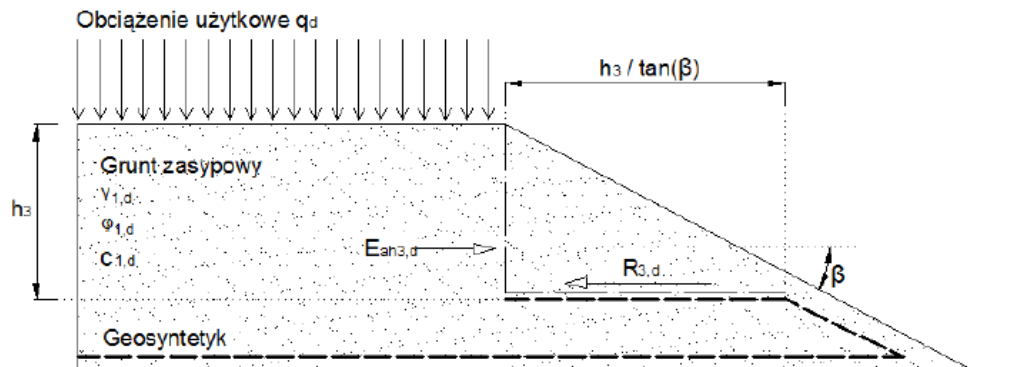
1) poślizg w nasypie po górnej powierzchni części zawiniętego geosyntetyku

$$E_{ah3,d} \leq R_{3,d} \quad (3.4)$$

gdzie:

$E_{ah3,d}$ - projektowa wartość składowej poziomej parcia czynnego dla miąższości nasypu powyżej zawinięcia zbrojenia,

$R_{3,d}$ - projektowa wartość siły tarcia między gruntem zasypowym, a górną powierzchnią geosyntetyku na długości zawinięcia.



Rysunek 3.5 Poślizg konstrukcji z zawinięciem zbrojenia – warunek 1 [14]

2) poślizg w nasypie po górnej powierzchni geosyntetyku w podstawie

$$E_{ah,d} \leq R_{O,d} + \min(R_{3,d}, R_{B,d}) \quad (3.5)$$

gdzie:

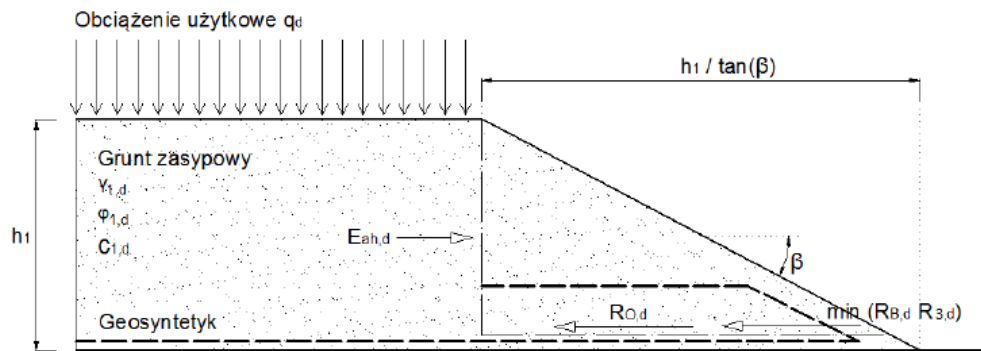
$E_{ah,d}$ - projektowa wartość składowej poziomej parcia czynnego,

$R_{O,d}$ - projektowa wartość oporu tarcia pomiędzy górną powierzchnią geosyntetyku a gruntem zasypowym,

$R_{3,d}$ - projektowa wartość siły tarcia między gruntem zasypowym, a górną powierzchnią geosyntetyku na długości zawinięcia,

$R_{B,d}$ - projektowa wartość wytrzymałości zbrojenia (STR).

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu



Rysunek 3.6 Poślizg konstrukcji z zawinięciem zbrojenia – warunek 2 [14]

3) poślizg w podłożu po dolnej powierzchni geosyntetyku w podstawie

Dla konstrukcji z "zawiniętym" zbrojeniem należy dokonać również analizy stateczności na poślizg na dolnej powierzchni zbrojenia według wzoru 3.3.

Oddziaływania i opory

Parcie od ciężaru gruntu i obciążeń użytkowych (dla całej wysokości nasypu):

$$E_{ah,d} = \gamma_G \cdot (\gamma_{1,k} \cdot 0,5 \cdot h_1 \cdot h_1 \cdot K_{agh}) + \gamma_Q \cdot (q_k \cdot h_1 \cdot K_{aph})$$

gdzie:

h_1 - całkowita wysokość nasypu,

K_{agh} - współczynnik parcia poziomego gruntu dla obciążeń stałych,

K_{aph} - współczynnik parcia poziomego gruntu dla obciążeń użytkowych,

$$K_{aph} = K_{agh} = tg^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'_{1,k}}{2} \right)$$

q_k - charakterystyczna wartość obciążenia użytkowego,

$\gamma_{1,k}$ - charakterystyczna wartość ciężaru objętościowego gruntu zasypowego,

γ_G - częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla stałych oddziaływań w stanie granicznym GEO,

γ_Q - częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla zmiennych oddziaływań w stanie granicznym GEO.

Siła tarcia na górnej powierzchni geosyntetyku:

$$R_{O,d} = 0,5 \cdot \gamma_{1,d} \cdot \left(\frac{h_1}{\tan\beta} \right) \cdot h_1 \cdot f_{1g,d}$$

gdzie:

β - kąt nachylenia skarpy nasypu, $\tan\beta = 1:n$

$f_{1g,d}$ - projektowa wartość współczynnika tarcia między materiałem zasypowym a geosyntetykiem, zachowawczo: $f_{1g,d} = 0,5 \cdot \tan\varphi'_{1,d}$

Siła tarcia na dolnej powierzchni geosyntetyku:

w stanie początkowym:

$$R_{U,d} = c_{u2,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta}$$

gdzie:

$c_{u2,d}$ - projektowa wartość wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu,

w stanie końcowym:

$$R_{U,d} = c'_{2,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} + 0,5 \cdot \gamma_{1,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} \cdot h_1 \cdot f_{2g,d}$$

gdzie:

$c'_{2,d}$ - projektowa wartość spójności w warunkach z odpływem,

$f_{2g,d}$ - projektowa wartość współczynnika tarcia pomiędzy geosyntetykiem, a gruntem podłoża: $f_{2g,d} = 0,5 \cdot \tan\varphi'_{2,d}$

Siła tarcia na górnej powierzchni geosyntetyku dla wariantu zawinięcia zbrojenia:

$$R_{3,d} = 0,5 \cdot \gamma_{1,d} \cdot \left(\frac{h_3}{\tan\beta} \right) \cdot h_3 \cdot f_{1g,d}$$

gdzie:

h_3 – wysokość nasypu powyżej zawinięcia zbrojenia.

3.1.4. Wyparcie

Analizę wyparcia gruntu słabonośnego wykonuje się dla stanu granicznego nośności (GEO) i jedynie dla początkowego stanu konstrukcji. Polega ona na sprawdzeniu warunków:

$$1) E_{ah4,d} \leq R_{Ep4,d} + R_{U,d} + R_{4,d} \quad (3.6)$$

gdzie:

$E_{ah4,d}$ – projektowa wartość parcia gruntu słabonośnego,

$R_{Ep4,d}$ – projektowa wartość parcia biernego od czoła bryły gruntu wypieranego,

$R_{U,d}$ – projektowa wartość siły tarcia na dolnej powierzchni geosyntetyku,

$R_{4,d}$ – projektowa wartość siły tarcia na dolnej powierzchni bryły gruntu wypieranego.

$$2) R_{U,d} \leq \min (R_{B,d} , R_{A,d}) \quad (3.7)$$

gdzie:

$R_{U,d}$ – projektowa wartość siły tarcia na dolnej powierzchni geosyntetyku,

$R_{B,d}$ – projektowa wartość wytrzymałości zbrojenia (STR)

$R_{A,d}$ – projektowa wartość oporu na wyciąganie zbrojenia (GEO).

Oddziaływania i opory

Parcie gruntu słabonośnego wynikające z przechylenia nasypu:

$$E_{ah4,d} = \gamma_G \cdot (\gamma_{1,k} \cdot h_1 \cdot h_4 + 0,5 \cdot \gamma_{2,k} \cdot h_4^2 - 2 \cdot c_{u2,k} \cdot h_4) + \gamma_Q \cdot q_k \cdot h_4$$

gdzie:

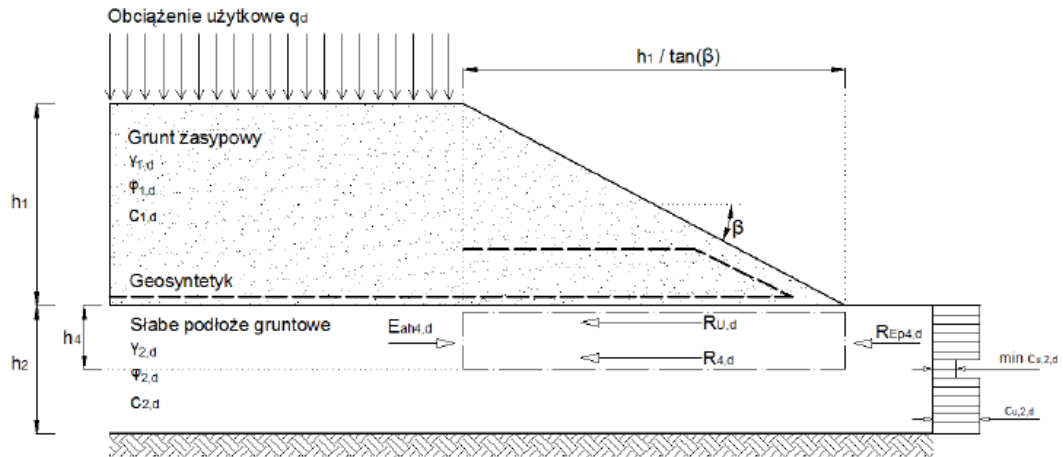
h_4 - miąższość bryły gruntu wypieranego (rys. 3.7).

Parcie bierne od czoła bryły wypieranego gruntu:

$$R_{Ep4,d} = 0,5 \cdot \gamma_{2,d} \cdot h_4^2 + 2 \cdot c_{u2,d} \cdot h_4$$

Wartość siły tarcia w podłożu na dolnej powierzchni bryły wypieranego gruntu:

$$R_{4,d} = c_{u2,min,d} \cdot \left(\frac{h_1}{\tan \beta} \right)$$



Rysunek 3.7 Wyparcie gruntu słabego [14]

3.1.5. Nośność

Nośność słabego podłoża pod nasypem ze wzmocnieniem geosyntetycznym w podstawie należy sprawdzać jak dla fundamentów powierzchniowych w oparciu o normę DIN 4017 [5], według wzoru:

$$R_N = a' \cdot b' \cdot (\gamma_2 \cdot b' \cdot N_b + \gamma_1 \cdot d \cdot N_d + c \cdot N_c) \quad (3.8)$$

gdzie:

R_N - opór podłoża

a' - długość fundamentu

b' - szerokość fundamentu

d - zagłębienie fundamentu

N_d, N_b, N_c - współczynniki nośności

$$N_d = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi}$$

$$N_b = (N_d - 1) \cdot \tan \varphi$$

$$N_c = (N_d - 1) / \tan \varphi$$

$$\text{Dla } \varphi = 0^\circ \rightarrow N_d = 1, N_c = (\pi + 2) = 5,14, \quad N_b = 0$$

Nasyp traktowany jest jak kwazi-monolit. Rozpatrywany jest stan graniczny konstrukcji (STR).

Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla tego przypadku przedstawiono w tabeli 3.3.

Tabela 3.3 Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla nośności – stan STR [14]

współczynnik	wartość
γ_G	1,35
γ_Q	1,5
γ_φ	1,0
γ_{Cu}	1,0
γ_C	1,0
γ_γ	1,0
γ_{Gr}	1,4

W budowlach takich jak nasypy posadowione na słabonośnym podłożu, decydującą rolę zazwyczaj odgrywa stateczność konstrukcji, a nie nośność podłoża gruntowego.

3.1.6. Dobór geosyntetyku

Dobór wyrobu geosyntetycznego odbywa się na podstawie projektowych wartości długoterminowej wytrzymałości geosyntetyku na rozciąganie $R_{B,d}$ i tzw. oporów kotwienia $R_{A,d}$.

Projektową długoterminową wytrzymałość geosyntetyku na rozciąganie należy określić na podstawie poniższego wzoru:

$$R_{B,d} = \frac{R_{B,k}}{\gamma_M}$$

γ_M - częściowy współczynnik bezpieczeństwa materiałowego dla konstrukcji z gruntu zbrojonego elementami odkształcalnymi (tab. 3.4).

Charakterystyczną długoterminową wytrzymałość na rozciąganie $R_{B,k}$ można uzyskać poprzez zredukowanie wytrzymałości krótkoterminowej $R_{Bk,0}$ (deklarowanej przez producenta, określanej dla 95% poziomu ufności z badań rozciągania wyrobu) za pomocą współczynników $A_1 \div A_5$:

$$R_{B,k} = \frac{R_{Bk,0}}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5} \quad (3.9)$$

Współczynniki redukujące:

A_1 - współczynnik uwzględniający odkształcenie i zniszczenie przy pełzaniu,

A_2 - współczynnik uwzględniający uszkodzenia podczas transportu i wbudowywania,

A_3 - współczynnik uwzględniający wpływ szwów i połączeń,

A_4 - współczynnik uwzględniający wpływ środowiska,

A_5 - współczynnik uwzględniający oddziaływania dynamiczne.

Wymagane parametry wyrobu i współczynniki redukcyjne powinny być deklarowane przez producenta w postaci raportów z badań przeprowadzonych w niezależnych laboratoriach lub danych z aprobat technicznych. W przeciwnym razie, należy zastosować współczynniki redukcyjne podane w zaleceniach EBGE0 [14].

Tabela 3.4 Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla zbrojenia [14]

Wytrzymałość	Symbol	Stan trwały (LC1)	Stan przejściowy (LC2)	Stan wyjątkowy (LC3)
Wytrzymałość zbrojenia na rozciąganie	γ_M	1,4	1,3	1,2
Opór zbrojenia na wyciąganie	γ_B	1,4	1,3	1,2

Opór na wyciąganie (tzw. opór kotwienia) zbrojenia zależy od naprężenia ścinającego w gruncie, zmobilizowanego na powierzchni zbrojenia. Projektową wartość oporu na wyciąganie $R_{A,d}$ określa się przez podzielenie charakterystycznej wartości oporu na wyciąganie przez częściowy współczynnik bezpieczeństwa stosowany do odkształcalnych elementów zbrojenia γ_B określony na podstawie normy DIN 1054, (tabela 3.4). Projektowa wartość oporu na wyciąganie $R_{A,d}$ wynosi:

$$R_{A,d} = \frac{R_{A,k}}{\gamma_B}$$

γ_B - częściowy współczynnik bezpieczeństwa ze względu na opór na wyciąganie zbrojenia (tab. 3.4).

W stanie granicznym charakterystyczną wartość oporu na wyciąganie oblicza się ze wzoru:

$$R_{A,k} = \sigma_{V,k} \cdot L_A \cdot f_{2g,k} \cdot n \quad (3.11)$$

gdzie:

n - liczba powierzchni tarcia,

$R_{A,k}$ - charakterystyczna wartość oporu na wyciąganie zbrojenia (w odniesieniu do 1 m szerokości),

$\sigma_{V,k}$ - charakterystyczna wartość naprężenia normalnego w warstwie zbrojenia,

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

L_A - długość zakotwienia zbrojenia poza rozpatrywaną powierzchnią zniszczenia,
 $f_{sg,k}$ - charakterystyczna wartość średnia współczynnika tarcia między gruntem zasypowym a warstwą zbrojenia:

$$f_{sg,k} = \lambda \cdot \tan\varphi_k = \frac{\tan\delta}{\tan\varphi} \cdot \tan\varphi_k$$

$\tan\delta$ - składowy współczynnik tarcia geosyntetyk/grunt (zmierzony),

$\tan\varphi$ - składowy współczynnik tarcia gruntu (zmierzony),

$\tan\varphi_k$ - charakterystyczna wartość współczynnika tarcia podłoża.

W przypadku braku danych z badań laboratoryjnych, w wytycznych EBGeo zaleca się przyjmować minimalną wartość współczynnika tarcia: $f_{sg,k} = 0,5 \cdot \tan\varphi'_k$

Jeżeli w obliczeniach uwzględnia się spójność to współczynnik tarcia wyznacza się według wzoru:

$$f_{sg,k} = f_{scg,k} = \lambda_c \cdot c_k = \frac{a}{c} \cdot c_k$$

gdzie:

a - przyczepność (adhezja) geosyntetyk/grunt (zmierzona),

c - spójność (kohezja) gruntu (zmierzona),

c_k - charakterystyczna wartość spójności gruntu.

W przypadku braku danych można przyjmować do celów projektowania minimalną wartość współczynnika tarcia: $f_{cg,k} = 0,5 \cdot c_u$ lub $0,5 \cdot c'_k$.

3.1.7. Analiza wyciągania zbrojenia

Analiza wyciągania zbrojenia powinna zostać przeprowadzona zarówno dla stanu początkowego jak i końcowego. W każdym przypadku należy wykazać, że spełniona jest poniższa nierówność:

$$R_{A,1g,d} + R_{A,2g,d} + R_{A,Um,d} \geq R_{A,d} \quad (3.12)$$

gdzie:

$R_{A,1g,d}$ – opór na wyciąganie dla górnej powierzchni geosyntetyku, stykającej się z gruntem zasypowym,

$R_{A,2g,d}$ – opór na wyciąganie dla dolnej powierzchni geosyntetyku stykającej, się ze słabym podłożem,

$R_{A,Um,d}$ – opór na wyciąganie spowodowany zawinięciem geosyntetyku,

$R_{A,d}$ – wymagany minimalny opór na wyciąganie zbrojenia.

Opór na wyciąganie dla górnej warstwy geosyntetyku:

$$R_{A,1g,d} = \frac{G_{LAI,k} \cdot f_{1g,k}}{\gamma_B}$$

gdzie:

$G_{LAI,k}$ – obciążenie stałe, działające na długości zakotwienia L_{Ai} ,

$f_{1g,k}$ – charakterystyczna wartość współczynnika tarcia między geosyntetykiem a gruntem zasypowym.

Opór na wyciąganie dla dolnej warstwy geosyntetyku:

dla stanu początkowego:

$$R_{A,2g,d} = \frac{a_k \cdot L_{Ai}}{\gamma_B}$$

gdzie:

a_k – charakterystyczna wartość adhezji między słabym podłożem a geosyntetykiem,

L_{Ai} – długość zakotwienia.

dla stanu końcowego:

$$R_{A,2g,d} = \frac{G_{LAI,k} \cdot f_{2g,k}}{\gamma_B}$$

gdzie:

$f_{2g,k}$ – charakterystyczna wartość współczynnika tarcia między geosyntetykiem a słabym gruntem.

Opór na wyciąganie spowodowany zawinięciem zbrojenia:

$$R_{A,Um,d} = \frac{2 \cdot G_{Um,k} \cdot f_{1g,k}}{\gamma_B}$$

gdzie:

$G_{Um,k}$ – obciążenie ciężarem gruntu działające na zawinięcie zbrojenia.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

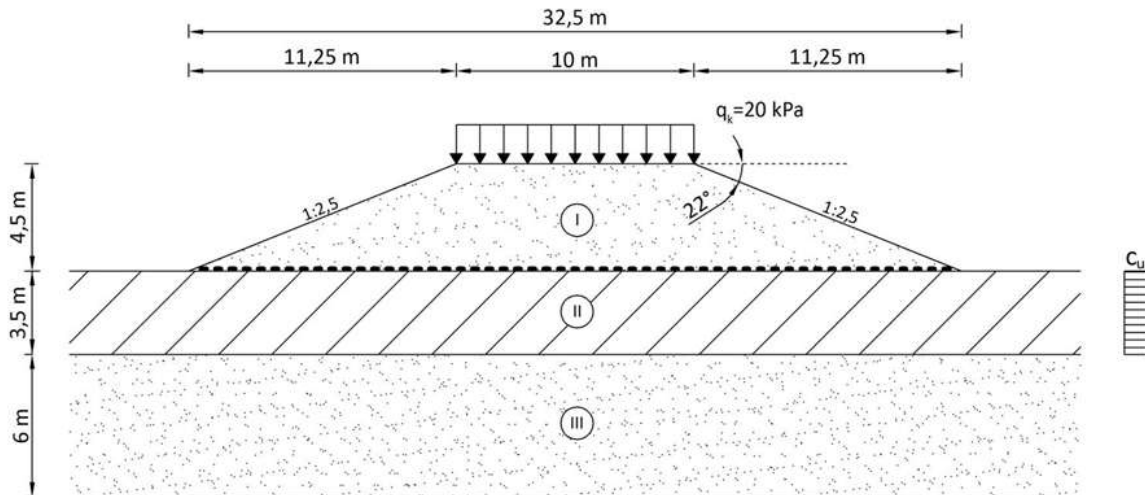
Obliczenie obciążenia stałego, działającego na długości zakotwienia L_{Ai} :

$$\text{dla } L_{Ai} > \tan\beta \cdot h_1: G_{L_{Ai},k} = 0,5 \cdot (L_{Ai} + L_{Ai} - b_3) \cdot h_1 \cdot \gamma_k$$

$$\text{dla } L_{Ai} \leq \tan\beta \cdot h_1: G_{L_{Ai},k} = 0,5 \cdot \tan\beta \cdot L_{Ai} \cdot L_{Ai} \cdot \gamma_k$$

3.2. Przykład obliczeniowy

Dane wejściowe



Rysunek 3.8 Schemat konstrukcji – wariant I

Tabela 3.5 Parametry gruntowe

Grunt	Ciężar objętościowy $\gamma_k \left[\frac{kN}{m^3} \right]$	Warunki bez odpływu		Warunki z odpływem	
		$\varphi_u [^\circ]$	$c_u [kPa]$	$\varphi' [^\circ]$	$c' [kPa]$
I. Zasypany (MSa)	18,5	–	–	32	0
II. "Słaby" (Or)	13	0	15,5	11	8
III. "Mocny" (CSa)	19,5	–	–	34	0

Obliczeniowe wartości parametrów geotechnicznych

Do obliczeń przyjęto częściowe współczynniki bezpieczeństwa zgodnie z tabelą 3.2 z wyjątkiem współczynnika dotyczącego wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu, ponieważ wg EC7 w podejściu projektowym 3 - powinno przyjmować się: $\gamma_{cu} = 1,4$.

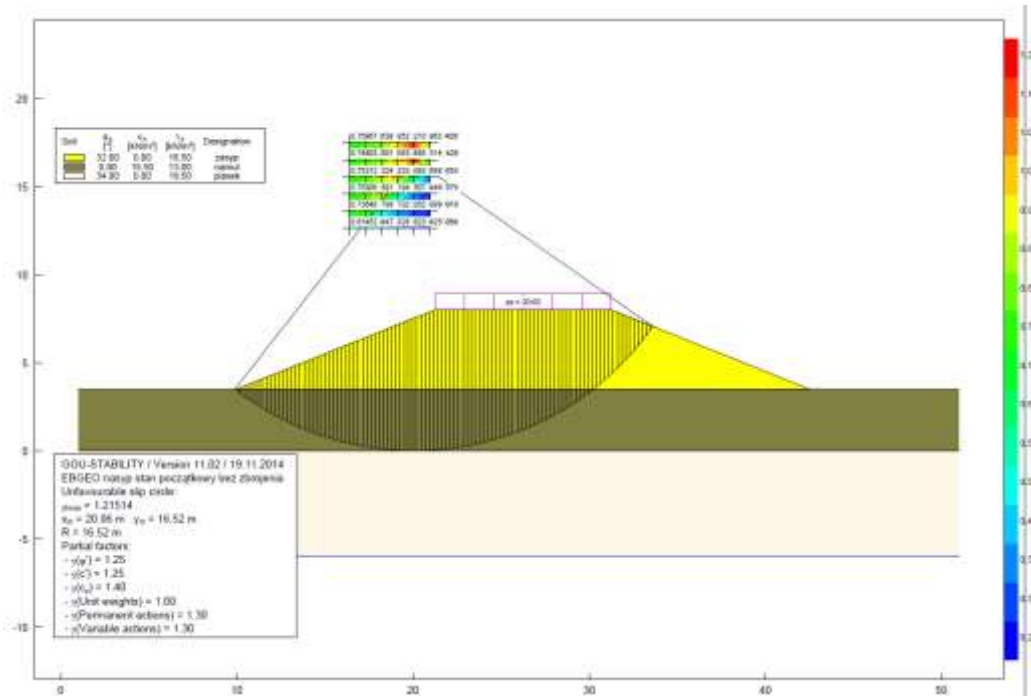
$$\phi'_{1,d} = \text{atan} \left(\frac{\tan(\phi'_{1,k})}{\gamma_{\phi}} \right) = \text{atan} \left(\frac{\tan(32^{\circ})}{1,25} \right) = 26,56^{\circ}$$

$$\phi'_{2,d} = \text{atan} \left(\frac{\tan(\phi'_{2,k})}{\gamma_{\phi}} \right) = \text{atan} \left(\frac{\tan(11^{\circ})}{1,25} \right) = 8,84^{\circ}$$

$$c'_{2,d} = \frac{c'_{2,k}}{\gamma_c} = \frac{8}{1,25} = 6,40 \text{ kPa} \quad c_{u2,d} = \frac{c_{u2,k}}{\gamma_{Cu}} = \frac{15,5}{1,40} = 11,07 \text{ kPa}$$

Stateczność ogólna dla kołowych powierzchni poślizgu

Analizę stateczności ogólnej przeprowadzono dla stanu początkowego i końcowego wykorzystując program komputerowy GGU Stability. Obliczenia wykonywano zgodnie z normą DIN 4084 [6], metodą Bishopa.



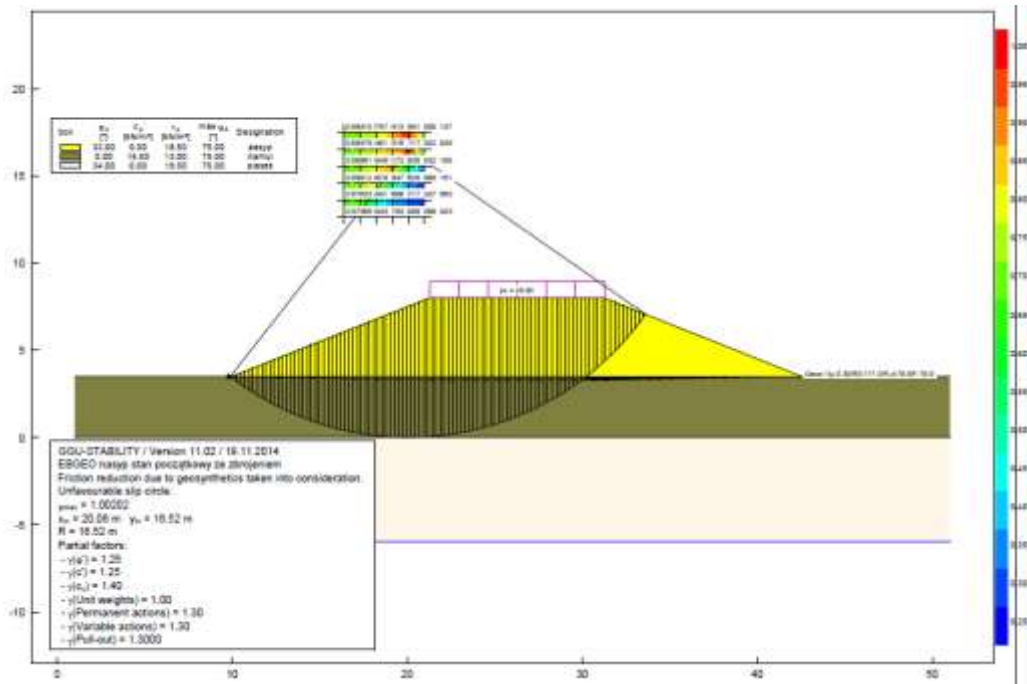
Rysunek 3.9 Stateczność ogólna - stan początkowy bez zbrojenia

Wyniki analizy:

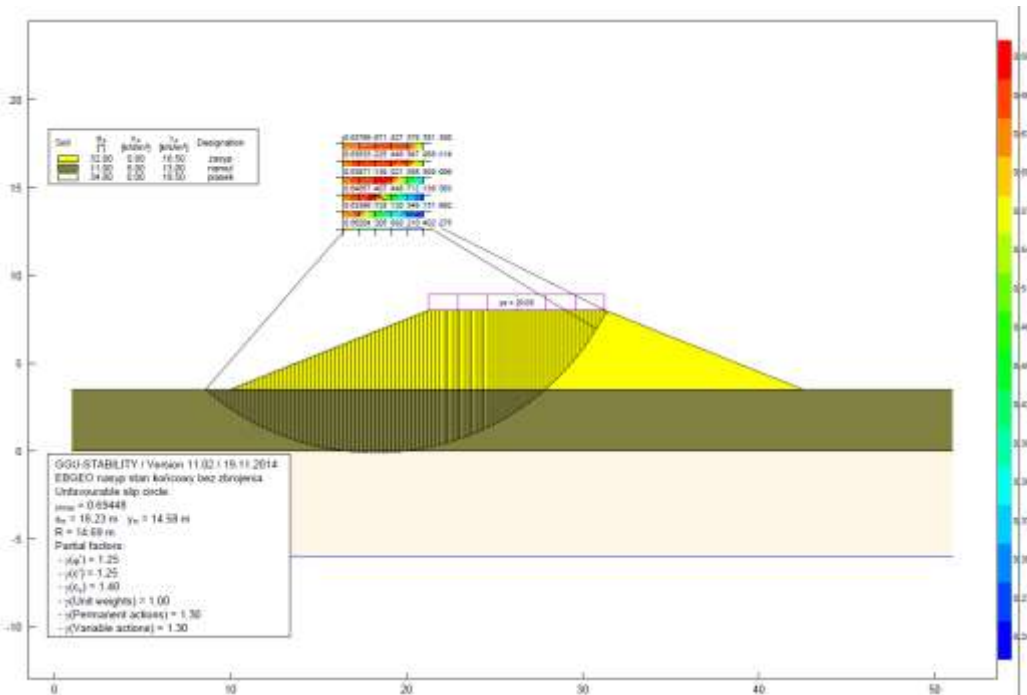
- stan początkowy, brak zbrojenia geosyntetycznego (rys. 3.9) - współczynnik wykorzystania: $\mu = 1,22$ - konstrukcja niestateczna,
- stan początkowy, konstrukcja ze zbrojeniem (wstępnie założono wariant bez zawinięcia zbrojenia) (rys. 3.10) - przyjmowano iteracyjnie wartość siły w geosyntetyku, tak by uzyskać wartość współczynnika wykorzystania: $\mu = \frac{E_M}{R_M} = 1$ - wymagana siła długoterminowa w geosyntetyku - 79,9 kN/m.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

- stan końcowy, konstrukcja brak zbrojenia geosyntetycznego (rys. 3.11) - współczynnik wykorzystania: $\mu = 0,70$ - konstrukcja stateczna bez zbrojenia geosyntetycznego.



Rysunek 3.10 Stateczność ogólna - stan początkowy ze zbrojeniem

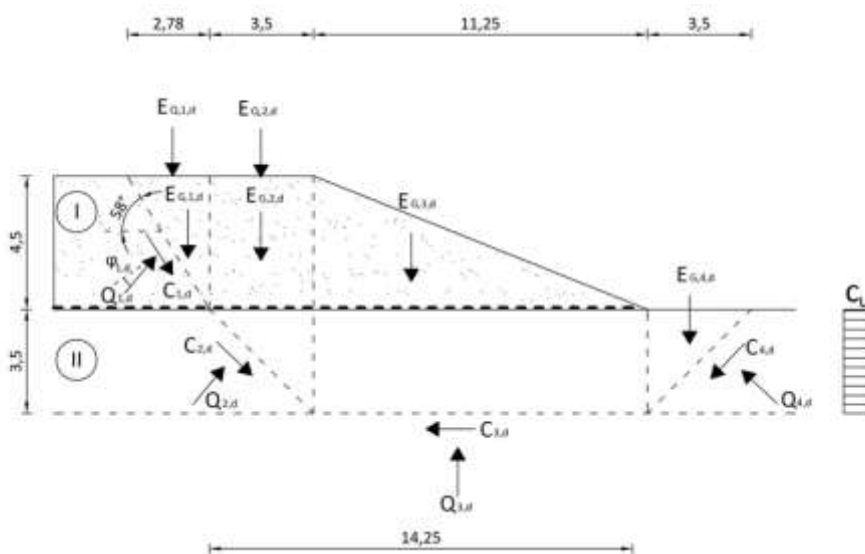


Rysunek 3.11 Stateczność ogólna - stan końcowy konstrukcji bez zbrojenia

Stateczność ogólna dla liniowo zdefiniowanych powierzchni poślizgu

Schemat powierzchni zniszczenia przedstawiono na rysunku 3.12. Przyjęto:

- podstawę bryły ulegającej zniszczeniu na głębokości: $h_4 = h_2 = 3,5 \text{ m}$,
- kąt zniszczenia w podłożu gruntowym: 45° ,
- kąt zniszczenia w nasypie: $45^\circ + \frac{\phi'_{1,d}}{2} = 45^\circ + \frac{26,56^\circ}{2} = 58,28^\circ$



Rysunek 3.12 Stateczność ogólna dla liniowo zdefiniowanych powierzchni poślizgu

Tabela 3.6 Parametry analizowanych „pasków”

Szerokość paska	Długość powierzchni poślizgu
$b_1 = \frac{4,5}{\tan(58,28^\circ)} = 2,78 \text{ m}$	$l_1 = \frac{4,5}{\sin(58,28^\circ)} = 5,29 \text{ m}$
$b_2 = 3,5 \text{ m}$	$l_2 = 3,5 \cdot \sqrt{2} = 4,95 \text{ m}$
$b_3 = 11,25 \text{ m}$	$l_3 = 11,25 \text{ m}$
$b_4 = 3,5 \text{ m}$	$l_4 = 3,5 \cdot \sqrt{2} = 4,95 \text{ m}$

Oddziaływania od ciężaru objętościowego gruntu:

$$E_{G,1,d} = 0,5 \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot \gamma_G = 0,5 \cdot 2,78 \cdot 4,5 \cdot 18,5 \cdot 1,0 = 115,72 \text{ kN/m}$$

$$E_{G,2,d} = b_2 \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot \gamma_G + 0,5 \cdot b_2 \cdot h_4 \cdot \gamma_{2,k} \cdot \gamma_G$$

$$= 3,5 \cdot 4,5 \cdot 18,5 \cdot 1,0 + 0,5 \cdot 3,5 \cdot 3,5 \cdot 13 \cdot 1,0 = 371,0 \text{ kN/m}$$

$$E_{G,3,d} = 0,5 \cdot b_3 \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot \gamma_G + b_3 \cdot h_4 \cdot \gamma_{2,k} \cdot \gamma_G$$

$$= 0,5 \cdot 11,25 \cdot 4,5 \cdot 18,5 \cdot 1,0 + 11,25 \cdot 3,5 \cdot 13 \cdot 1,0 = 980,16 \text{ kN/m}$$

$$E_{G,4,d} = 0,5 \cdot b_4 \cdot h_4 \cdot \gamma_{2,k} \cdot \gamma_G = 0,5 \cdot 3,5 \cdot 3,5 \cdot 13 \cdot 1,0 = 79,63 \text{ kN/m}$$

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

Oddziaływania od obciążenia użytkowego:

$$E_{Q,1,d} = b_1 \cdot q_k \cdot \gamma_Q = 2,78 \cdot 20 \cdot 1,3 = 72,28 \text{ kN/m}$$

$$E_{Q,2,d} = b_2 \cdot q_k \cdot \gamma_Q = 3,5 \cdot 20 \cdot 1,3 = 91,0 \text{ kN/m}$$

Siły spójności:

$$C_{1,d} = 0 \text{ kN/m}$$

$$C_{2,d} = l_2 \cdot c_{u,2,d} = 4,95 \cdot 11,07 = 54,80 \text{ kN/m}$$

$$C_{3,d} = l_3 \cdot c_{u,2,d} = 11,25 \cdot 11,07 = 124,54 \text{ kN/m}$$

$$C_{4,d} = l_4 \cdot c_{u,2,d} = 4,95 \cdot 11,07 = 54,80 \text{ kN/m}$$

Poziome siły dla każdego analizowanego klina:

$$H_{1,d} = (E_{G,1,d} + E_{Q,1,d}) \cdot \frac{\sin\left(45^\circ - \frac{\varphi'_{1,d}}{2}\right)}{\sin\left(45^\circ + \frac{\varphi'_{1,d}}{2}\right)} = (115,72 + 72,28) \cdot \frac{\sin\left(45^\circ - \frac{26,56^\circ}{2}\right)}{\sin\left(45^\circ + \frac{26,56^\circ}{2}\right)}$$
$$= 116,20 \text{ kN/m}$$

$$H_{2,d} = E_{G,2,d} + E_{Q,2,d} - 2 \cdot C_{2,d} \cdot 2^{-0,5} = 371,0 + 91,0 - 2 \cdot 54,8 \cdot 2^{-0,5}$$
$$= 384,50 \text{ kN/m}$$

$$H_{3,d} = -C_{3,d} = -124,54 \text{ kN/m}$$

$$H_{4,d} = -E_{G,4,d} - 2 \cdot C_{4,d} \cdot 2^{-0,5} = -79,63 - 2 \cdot 54,8 \cdot 2^{-0,5} = -157,13 \text{ kN/m}$$

Wypadkowa siła pozioma:

$$H = H_{1,d} + H_{2,d} + H_{3,d} + H_{4,d} = 116,20 + 384,5 - 124,54 - 157,13 = 219,03 \text{ kN/m}$$

Aby skarpa nasypu pozostała w równowadze projektowa wytrzymałość geosyntetyku na rozciąganie powinna wynosić $R_{B,d} = 219,03 \text{ kN/m}$, a w analizach wyciągania zbrojenia należy wykazać, że wartość oporów będzie wynosić co najmniej $R_{A,d} = 219,03 \text{ kN/m}$.

Stateczność na poślizg

Wariant I – bez zawinięcia zbrojenia

Sprawdzenie warunku na górnej powierzchni geosyntetyku (rys. 3.13)

$$E_{ah,d} \leq R_{O,d}$$

$$E_{ah,d} = \gamma_G \cdot (\gamma_{1,k} \cdot 0,5 \cdot h_1 \cdot h_1 \cdot K_{agh}) + \gamma_Q \cdot (q_k \cdot h_1 \cdot K_{aph})$$
$$= 1,0 \cdot (18,5 \cdot 0,5 \cdot 4,5 \cdot 4,5 \cdot 0,307) + 1,3 \cdot (20 \cdot 4,5 \cdot 0,307)$$
$$= 93,42 \text{ kN/m}$$

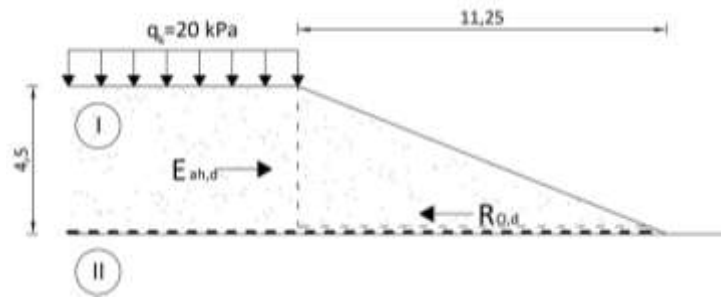
$$K_{aph} = K_{agh} = tg^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi'_{1,k}}{2} \right) = tg^2 \left(45^\circ - \frac{32^\circ}{2} \right) = 0,307$$

$$R_{O,d} = 0,5 \cdot \gamma_{1,d} \cdot \left(\frac{h_1}{\tan\beta} \right) \cdot h_1 \cdot f_{1g,d} = 0,5 \cdot 18,5 \cdot \left(\frac{4,5}{0,4} \right) \cdot 4,5 \cdot 0,250 = 117,07 \text{ kN/m}$$

$$\tan\beta = 1:n = 1:2,5 = 0,4$$

$$f_{1g,d} = 0,5 \cdot \tan\varphi'_{1,d} = 0,5 \cdot \tan 26,56^\circ = 0,250$$

$$93,42 \text{ kN/m} \leq 117,07 \text{ kN/m} \quad \text{warunek spełniony}$$



Rysunek 3.13 Poślizg nad warstwą zbrojenia – wariant I

Sprawdzenie warunku na dolnej powierzchni geosyntetyku (rys. 3.14)

$$E_{ah,d} \leq R_{U,d} + \min(R_{B,d}, R_{A,d})$$

Stan początkowy:

$$R_{U,d} = c'_{u2,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} = 11,07 \cdot \frac{4,5}{0,4} = 124,54 \text{ kN/m}$$

$$93,42 \text{ kN/m} \leq 124,54 \text{ kN/m} + \min(R_{B,d}, R_{A,d})$$

warunek spełniony (bez konieczności uwzględniania oporów zbrojenia)

Stan końcowy:

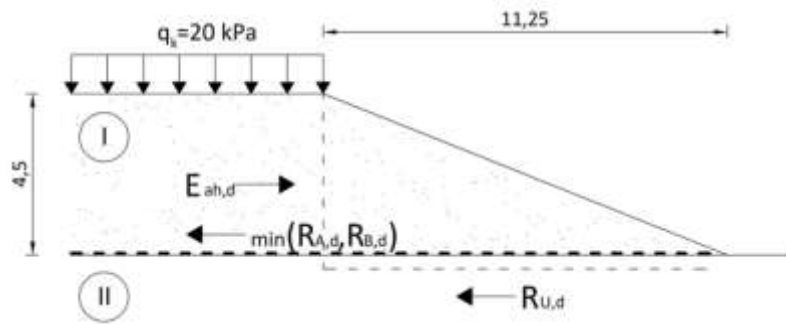
$$\begin{aligned} R_{U,d} &= c'_{2,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} + 0,5 \cdot \gamma_{1,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} \cdot h_1 \cdot f_{2g,d} \\ &= 6,40 \cdot \frac{4,5}{0,4} + 0,5 \cdot 18,5 \cdot \frac{4,5}{0,4} \cdot 4,5 \cdot 0,078 = 108,53 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$f_{2g,d} = 0,5 \cdot \tan\varphi'_{2,d} = 0,5 \cdot \tan 8,84^\circ = 0,078$$

$$93,42 \text{ kN/m} \leq 108,53 \text{ kN/m} + \min(R_{B,d}, R_{A,d})$$

warunek spełniony (bez konieczności uwzględniania oporów zbrojenia)

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu



Rysunek 3.14 Poślizg pod warstwą zbrojenia – wariant I

Wariant II – z zawinięciem zbrojenia

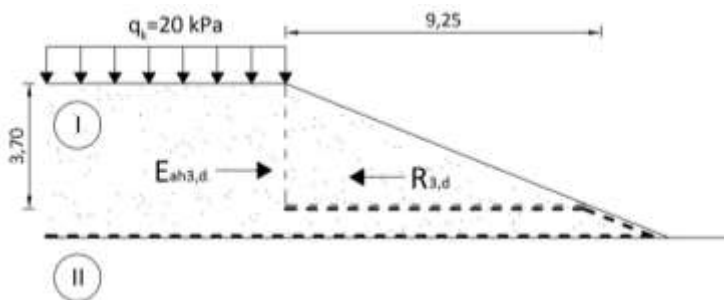
Sprawdzenie warunku na górnej powierzchni zawinięcia zbrojenia (rys. 3.15)

$$E_{ah3,d} \leq R_{3,d}$$

$$\begin{aligned} E_{ah3,d} &= \gamma_G \cdot (\gamma_{1,k} \cdot 0,5 \cdot h_3 \cdot h_3 \cdot K_{agh}) + \gamma_Q \cdot (q_k \cdot h_3 \cdot K_{aph}) \\ &= 1,0 \cdot (18,5 \cdot 0,5 \cdot 3,7 \cdot 3,7 \cdot 0,307) + 1,3 \cdot (20 \cdot 3,7 \cdot 0,307) \\ &= 68,41 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$R_{3,d} = 0,5 \cdot \gamma_{1,d} \cdot \left(\frac{h_3}{\tan \beta} \right) \cdot h_3 \cdot f_{1g,d} = 0,5 \cdot 18,5 \cdot \left(\frac{3,7}{0,4} \right) \cdot 3,7 \cdot 0,250 = 79,15 \text{ kN/m}$$

$$68,41 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \leq 79,15 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ warunek spełniony}$$



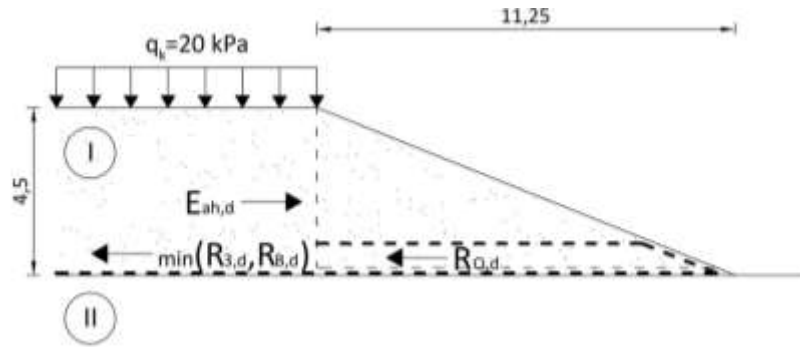
Rysunek 3.15 Poślizg nad zawinięciem zbrojenia – wariant II

Sprawdzenie warunku na górnej powierzchni geosyntetyku (rys. 3.16)

$$E_{ah,d} \leq R_{O,d} + \min(R_{3,d}, R_{B,d})$$

$$93,42 \text{ kN/m} \leq 117,07 \text{ kN/m} + \min(R_{3,d}, R_{B,d})$$

warunek spełniony (bez konieczności uwzględnienia zawinięcia zbrojenia)



Rysunek 3.16 Poślizg nad warstwą zbrojenia – wariant II

Sprawdzenie warunku dla dolnej powierzchni geosyntytyku (rys. 3.17)

$$E_{ah,d} \leq R_{U,d} + \min(R_{B,d}, R_{A,d})$$

Stan początkowy:

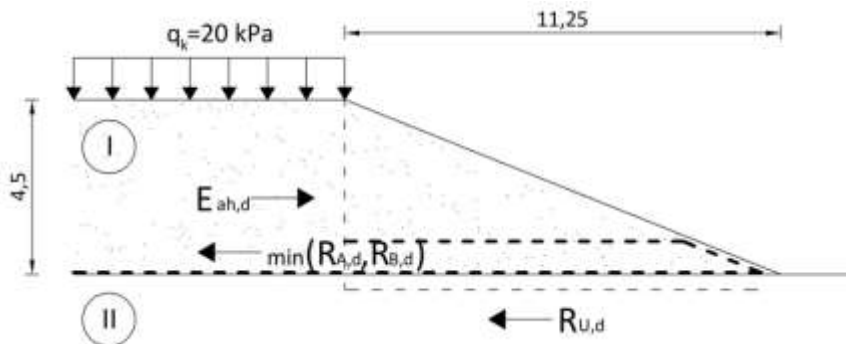
$$93,42 \text{ kN/m} \leq 124,54 \text{ kN/m} + \min(R_{B,d}, R_{A,d})$$

warunek spełniony (bez konieczności uwzględnienia oporów zbrojenia)

Stan końcowy:

$$93,42 \text{ kN/m} \leq 108,53 \text{ kN/m} + \min(R_{B,d}, R_{A,d})$$

warunek spełniony (bez konieczności uwzględnienia oporów zbrojenia)



Rysunek 3.17 Poślizg pod warstwą zbrojenia – wariant II

Stateczność na wyparcie

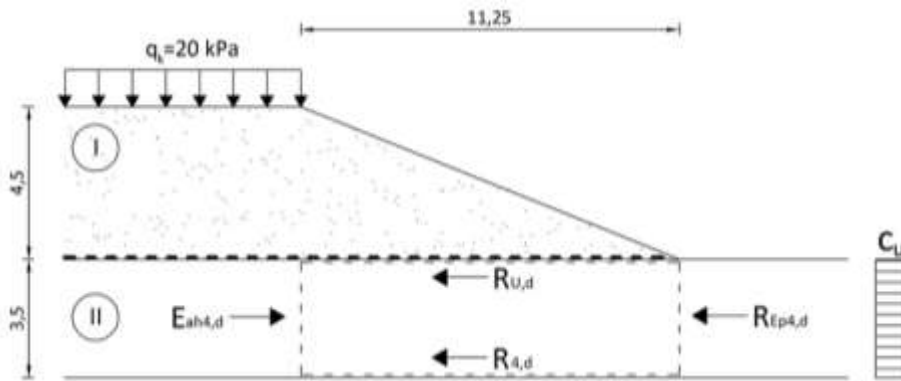
Sprawdzenie warunku wypierania bryły gruntu (rys 3.18)

$$E_{ah4,d} \leq R_{Ep4,d} + R_{U,d} + R_{4,d}$$

$$\begin{aligned} E_{ah4,d} &= \gamma_G \cdot (\gamma_{1,k} \cdot h_1 \cdot h_4 + 0,5 \cdot \gamma_{2,k} \cdot h_4^2 - 2 \cdot c_{u2,k} \cdot h_4) + \gamma_Q \cdot q_k \cdot h_4 \\ &= 1,0 \cdot (18,5 \cdot 4,5 \cdot 3,5 + 0,5 \cdot 13 \cdot 3,5^2 - 2 \cdot 15,5 \cdot 3,5) + 1,3 \cdot 20 \cdot 3,5 \\ &= 353,50 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{Ep4,d} &= 0,5 \cdot \gamma_{2,d} \cdot h_4^2 + 2 \cdot c_{u2,d} \cdot h_4 = 0,5 \cdot 13 \cdot 3,5^2 + 2 \cdot 11,07 \cdot 3,5 \\ &= 157,12 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$R_{U,d} = c_{u2,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} = 11,07 \cdot \frac{4,5}{0,4} = 124,54 \text{ kN/m}$$



Rysunek 3.18 Wyparcie

$$R_{4,d} = c_{u2,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} = 11,07 \cdot \frac{4,5}{0,4} = 124,54 \text{ kN/m}$$

$$353,5 \text{ kN/m} \leq 157,12 + 124,54 + 124,54 = 406,2 \text{ kN/m} \quad \text{warunek spełniony}$$

Określenie wartości wytrzymałości geosyntetyku lub oporów na wyciąganie

$$R_{U,d} \leq \min(R_{B,d}, R_{A,d})$$

$$\min(R_{B,d}, R_{A,d}) = 124,54 \text{ kN/m}$$

Nośność

Do obliczeń przyjęto częściowe współczynniki bezpieczeństwa zgodnie z tabelą 3.3, zgodnie z podejściem projektowym nr 2 wg EC7.

Nośność dla stanu początkowego:

$$E_d \leq R_{Nd} = \frac{R_{Nk}}{\gamma_{Gr}}$$

Opór podłoża w warunkach bez drenażu:

$$R_{Nk} = b' \cdot (\gamma_2 \cdot b' \cdot N_b + \gamma_1 \cdot d \cdot N_d + c \cdot N_c)$$

$$\text{dla } \varphi_u = 0^\circ \rightarrow N_d = 1, N_c = (\pi + 2) = 5,14, N_b = 0$$

$$R_{Nk} = b' \cdot c_u \cdot N_c$$

$$R_{Nk} = 32,5 \cdot 15,5 \cdot 5,14 = 2589,28 \text{ kN/m}$$

Oddziaływania:

wstępnie założono nasyp o wysokości 1,0 m

$$\begin{aligned} E_d &= \gamma_G \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot b' + \gamma_Q \cdot q_k \cdot b' = 1,35 \cdot 1,0 \cdot 18,5 \cdot 32,5 + 1,5 \cdot 20 \cdot 32,5 \\ &= 1786,69 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$1786,69 \text{ kN/m} \leq \frac{2589,28}{1,4} = 1849,49 \text{ kN/m} \text{ warunek spełniony dla nasypu o wys. 1,9 m.}$$

Nośność dla stanu końcowego:

$$E_d \leq R_{Nd} = \frac{R_{Nk}}{\gamma_{Gr}}$$

Opór podłoża:

$$R_{Nk} = b' \cdot (\gamma_2 \cdot b' \cdot N_b + \gamma_1 \cdot d \cdot N_d + c \cdot N_c)$$

$$N_d = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{11^\circ}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan 11^\circ} = 2,710$$

$$N_b = (2,71 - 1) \cdot \tan 11^\circ = 0,332$$

$$N_c = (2,71 - 1) / \tan 11^\circ = 8,797$$

$$R_{Nk} = 32,5 \cdot (13 \cdot 32,5 \cdot 0,332 + 0 + 8 \cdot 8,797) = 6846,0 \text{ kN/m}$$

Oddziaływania:

$$\begin{aligned} E_d &= \gamma_G \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot b' + \gamma_Q \cdot q_k \cdot b' = 1,35 \cdot 4,5 \cdot 18,5 \cdot 32,5 + 1,5 \cdot 20 \cdot 32,5 \\ &= 4627,59 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$4627,59 \text{ kN/m} \leq \frac{6846,0}{1,4} = 4890,0 \text{ kN/m} \text{ warunek spełniony (wytężenie 93\%)}$$

Dobór geosyntetyku

Doboru geosyntetyków należy dokonać na podstawie powyższych analiz, których wyniki zestawiono w tabeli 3.7.

Tabela 3.7 Projektowe wartości sił w geosyntetyku uzyskane z obliczeń

Analiza:	Projektowa wartość wytrzymałości geosyntetyku $R_{B,d}$ – stan początkowy	Projektowa wartość wytrzymałości geosyntetyku $R_{B,d}$ – stan końcowy
Stateczność ogólna - kołowa powierzchnia poślizgu	79,9 kN/m	0 kN/m
Stateczność ogólna – łamana powierzchnia poślizgu	219,03 kN/m	-
Poślizg	0 kN/m	0 kN/m
Wyparcie	124,54 kN/m	-
Wartość maksymalna $R_{B,d}$:	219,03 kN/m	0 kN/m

Tabela 3.8 Wymagane krótkoterminowe wytrzymałości geosyntetyku

	Stan początkowy	Stan końcowy
$R_{B,d}$	219,03 kN/m	0 kN/m
A_1	1,45	1,52
A_2	1,1	1,1
A_3	1,0	1,0
A_4	1,03	1,14
A_5	1	1,0
γ_M	1,3	1,4
$R_{B,k0}$	467,9 kN/m	0 kN/m

Krótkoterminową wytrzymałość geosyntetyku obliczono na podstawie poniższego wzoru, wykorzystując współczynniki redukcyjne deklarowane przez producenta wybranej geotkaniny poliestrowej:

$$R_{B,k0} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot \gamma_M \cdot R_{b,d}$$

Przyjęto geotkaninę 600/50, o wytrzymałości krótkoterminowej: $F_k = 600 \text{ kN/m} \geq R_{B,k0,max} = 467,9 \text{ kN/m}$ (wytężenie geosyntetyku równe 78%). Założono dwie warstwy zbrojenia jednokierunkowego w układzie prostopadłym, oddzielone kruszywem o miąższości 20 cm.

Analiza wyciągania zbrojenia

Analiza wyciągania zbrojenia powinna zostać przeprowadzona zarówno dla stanu początkowego jak i końcowego. W każdym przypadku należy wykazać, że spełniona jest nierówność (3.12).

Wymagane opory na wyciągnięcie zbrojenia uzyskane z przedstawionych powyżej analiz, zestawiono w tabeli 3.9. W tabelach od 3.10 do 3.12 przedstawiono obliczenia niezbędne do sprawdzenia geosyntetyku na wyciągnięcie w stanie początkowym konstrukcji. W niniejszym przykładzie w stanie końcowym zbrojenie geosyntetyczne nie jest wymagane (patrz tab. 3.7 i 3.9).

Tabela 3.9 Wymagane opory na wyciągnięcie zbrojenia i długości zakotwienia

Analiza	Stan początkowy		Stan końcowy	
	Opór na wyciągnięcie zbrojenia $R_{A,d}$	Długość zakotwienia L_{Ai}	Opór na wyciągnięcie zbrojenia $R_{A,d}$	Długość zakotwienia L_{Ai}
1) Stateczność ogólna – kołowa powierzchnia poślizgu	79,9 kN/m	20,2 m	-	-
2) Stateczność ogólna – łamana powierzchnia poślizgu	219,08 kN/m	14,25 m	-	-
3) Poślizg	-	-	-	-
4) Wyparcie	124,55 kN/m	10,75 m	-	-

Długości zakotwienia (tab. 3.9) w przypadku stateczności ogólnej dla kołowej powierzchni poślizgu określono z programu GGU Stability. Natomiast dla pozostałych analiz obliczono z poniższych wzorów (przyjęto odległość zbrojenia od lica nasypu równą 0,5 m):

- stateczność ogólna dla liniowych powierzchni poślizgu:

$$b_2 + b_3 - 0,5 = 3,5 + 11,25 - 0,5 = 14,25 \text{ m}$$
- wyparcie (i poślizg): $b_3 - 0,5 = 11,25 - 0,5 = 10,75 \text{ m}$

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

Tabela 3.10 Obliczenia obciążenia działającego na długości zakotwienia - stan początkowy

Analiza	L_{Ai}	$G_{LAi,k} = 0,5 \cdot (L_{Ai} + L_{Ai} - b_3) \cdot h_1 \cdot \gamma_k$
1)	20,2 m	$G_{LA1,k} = 0,5 \cdot (2 \cdot 20,2 - 11,25) \cdot 4,5 \cdot 18,5$ $= 1213,37 \text{ kN/m}$
2)	14,25 m	$G_{LA2,k} = 0,5 \cdot (2 \cdot 14,25 - 11,25) \cdot 4,5 \cdot 18,5$ $= 718,03 \text{ kN/m}$
4)	10,75 m	$G_{LA4,k} = 0,5 \cdot (2 \cdot 10,75 - 11,25) \cdot 4,5 \cdot 18,5$ $= 426,66 \text{ kN/m}$

Tabela 3.11 Obliczenia oporów - stan początkowy

	$R_{A,1g,d} = \frac{G_{LAi,k} \cdot f_{1g,k}}{\gamma_B}$	$R_{A,2g,d} = \frac{a_k \cdot L_{Ai}}{\gamma_B}$	$R_{A,Um,d} = \frac{2 \cdot G_{Um,k} \cdot f_{1g,k}}{\gamma_B}$	$R_{A,d}$
1)	$\frac{1213,37 \cdot 0,312}{1,3}$ $= 291,21 \text{ kN/m}$	$\frac{7,75 \cdot 20,2}{1,3} = 120,42 \text{ kN}$ $/\text{m}$	$\frac{2 \cdot 316,58 \cdot 0,312}{1,3}$ $= 151,96 \text{ kN}$ $/\text{m}$	79,9 kN/m
2)	$\frac{718,03 \cdot 0,312}{1,3}$ $= 172,33 \text{ kN/m}$	$\frac{7,75 \cdot 14,25}{1,3} = 84,95 \text{ kN}$ $/\text{m}$	$\frac{2 \cdot 316,58 \cdot 0,312}{1,3}$ $= 151,96 \text{ kN}$ $/\text{m}$	219,03 kN/m
4)	$\frac{426,66 \cdot 0,312}{1,3}$ $= 102,40 \text{ kN/m}$	$\frac{7,75 \cdot 10,75}{1,3} = 64,09 \text{ kN}$ $/\text{m}$	$\frac{2 \cdot 316,58 \cdot 0,312}{1,3}$ $= 151,96 \text{ kN}$ $/\text{m}$	124,54 kN/m

gdzie: γ_B - częściowy współczynnik bezpieczeństwa ze względu na opór na wyciąganie zbrojenia, zależny od stanu konstrukcji (tab. 3.4).

$$G_{Um,k} = 0,5 \cdot h_3 \cdot b'_3 \cdot \gamma_{1,k} = 0,5 \cdot 3,7 \cdot 9,25 \cdot 18,5 = 316,58 \text{ kN/m}$$

$$f_{1g,k} = 0,5 \cdot \tan \varphi'_{1,k} = 0,5 \cdot \tan 32^\circ = 0,312$$

$$a_k = 0,5 \cdot c_{u,k} = 0,5 \cdot 15,5 = 7,75 \text{ kPa}$$

Tabela 3.12 Sprawdzenie wyciągania zbrojenia (porównanie oporów) - stan początkowy

Analiza	$R_{A,1g,d} + R_{A,2g,d} \geq R_{A,d}$	Wariant zawinięcia zbrojenia	$R_{A,1g,d} + R_{A,2g,d} + R_{A,Um,d} \geq R_{A,d}$	Wariant z zawinięciem zbrojenia
1)	411,63 > 79,9	OK	563,69 > 79,9	OK
2)	257,28 > 219,03	OK	409,24 > 219,03	OK
4)	166,49 > 124,54	OK	318,45 > 124,54	OK

3.3. Uwagi do analiz wg EBGeo 2010

Wytyczne EBGeo [14] stanowią jasny i przejrzysty schemat projektowania posadowień nasypów na słabonośnym podłożu ze wzmocnieniem geosyntetycznym w podstawie. Zalecenia oparte na nowych normach niemieckich DIN są generalnie zgodne z normą europejską EC 7 [22]. Można jednak dostrzec niewielkie różnice, np. w kwestii przyjmowania współczynników bezpieczeństwa. Obliczenia stateczności prowadzone z zastosowaniem podejścia obliczeniowego nr 3 wg EC 7 wiążą się z przyjęciem zestawu współczynników: $A1 + M2 + R3$. Dla stanu GEO współczynniki z EC 7 są w większości zgodne z tabelą 3.2, przedstawiającą współczynniki wg EBGeo. Różnicę można dostrzec w przypadku wartości współczynnika γ_{cu} - wg EC 7 przyjmuje on wartość równą 1,4, a wg norm niemieckich 1,25. W obliczeniach nośności, w których stosuje się podejście obliczeniowe nr 2 wg EC 7, zestaw współczynników $A1 + M1 + R2$ dla stanu STR nie odbiega w żaden sposób od współczynników podawanych w EBGeo (tabela 3.3).

Analizując przykład obliczeniowy zamieszczony w EBGeo 2010 [14] na końcu rozdziału 4, można dostrzec rozbieżności dotyczące ustalania wartości obliczeniowej efektywnego kąta tarcia wewnętrznego gruntu. W części teoretycznej powołano zależność: $\tan\varphi_d = \tan\left(\frac{\varphi_k}{\gamma_\varphi}\right)$, a w części obliczeniowej: $\varphi_d = \text{atan}\left(\frac{\tan\varphi_k}{\gamma_\varphi}\right)$. Obydwa wzory dają różne wartości obliczeniowego efektywnego kąta tarcia wewnętrznego. Warto podkreślić, że zależność wykorzystana w części obliczeniowej jest zgodna z zapisem w EC 7.

Kolejną nieścisłością, którą można zauważyć w zaleceniach EBGeo jest kwestia poślizgu. Według przytoczonej w EBGeo normy DIN 1054, poślizg należy rozpatrywać dla stanu granicznego STR, natomiast przykładowe obliczenia opatrzone są komentarzem, iż

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

stateczność na poślizg sprawdzono dla stanu granicznego GEO. Analizując poślizg można stwierdzić, że nie zawsze zawinięcie zbrojenia jest potrzebne. Przyjęta zbyt duża wysokość zawinięcia zbrojenia może skutkować niespełnieniem warunku na przesuw nad wywinięciem zbrojenia. Prowadzi to do wniosku, że w niektórych sytuacjach zawinięcie zbrojenia, zamiast poprawiać, powoduje pogorszenie stateczności konstrukcji na poślizg. Należy również podkreślić, że do poślizgu „pod” zbrojeniem może dojść tylko w przypadku jego zerwania.

Dokonując analizy wyciągania zbrojenia można natrafić na niezgodności związane z przyjmowaniem współczynnika γ_B . Zgodnie z tabelą 3.3 częściowy współczynnik bezpieczeństwa dotyczący oporów na wyciąganie giętkich elementów zbrojenia należy przyjmować w zależności od przypadku obciążenia. W przykładzie EBGeo współczynnik ten przyjmowano zarówno dla stanu początkowego jak i końcowego równy 1,4, pomimo że dla stanu początkowego - budowlanego wynosi on 1,3. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na to, że zgodnie z normą DIN 1054, do której odwołuje się EBGeo opór zbrojenia na wyciąganie analizowany jest dla stanu, w którym określone są projektowe wartości oddziaływań czyli dla stanu GEO, natomiast współczynnik γ_B zaczerpnięto z tabeli 3.4, która odnosi się do stanu STR.

4.0 PROJEKTOWANIE WZMOCNIENIA PODSTAWY NASYPU WEDŁUG NORMY BS 8006:2010

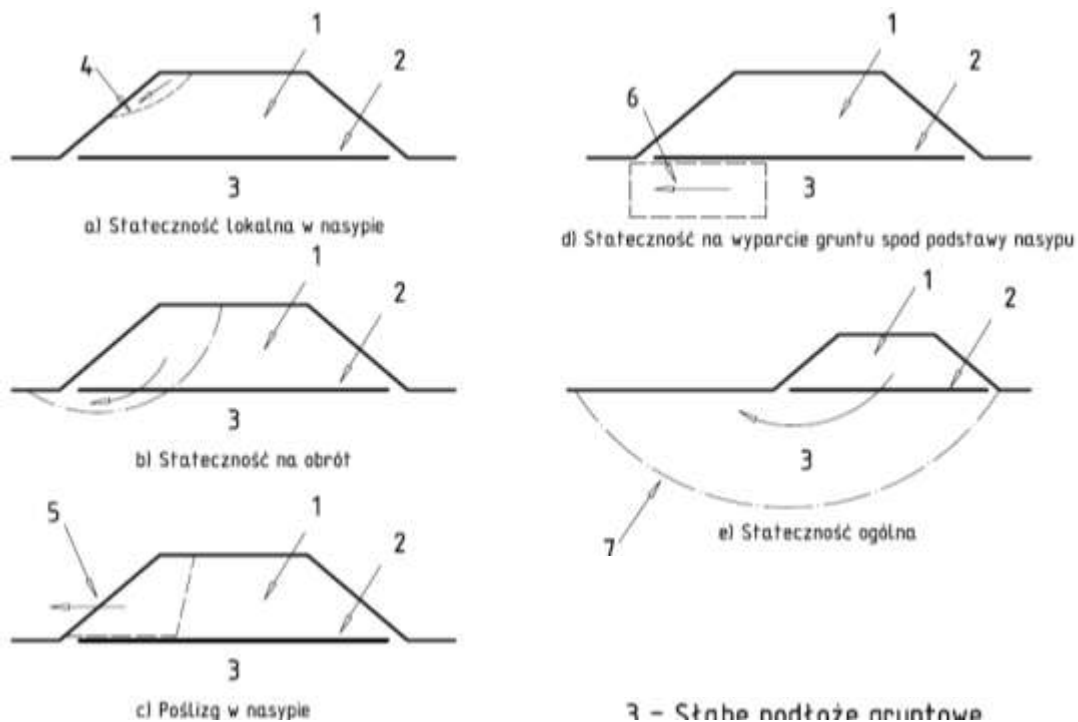
4.1. Zalecane analizy stateczności

Według normy brytyjskiej BS 8006:2010 [2] w przypadku nasypu na słabym podłożu gruntowym należy dokonać analizy następujących stanów granicznych nośności (rys. 4.1):

- stateczność lokalna w nasypie,
- stateczność na obrót,
- poślizg w nasypie,
- stateczność na wyparcie gruntu spod podstawy nasypu,
- stateczność ogólna.

Ponadto przy analizie konstrukcji należy rozpatrzyć następujące stany graniczne użytkowości (rys. 4. 2):

- nadmierne odkształcenia (wydłużenie) zbrojenia,
- osiadania.

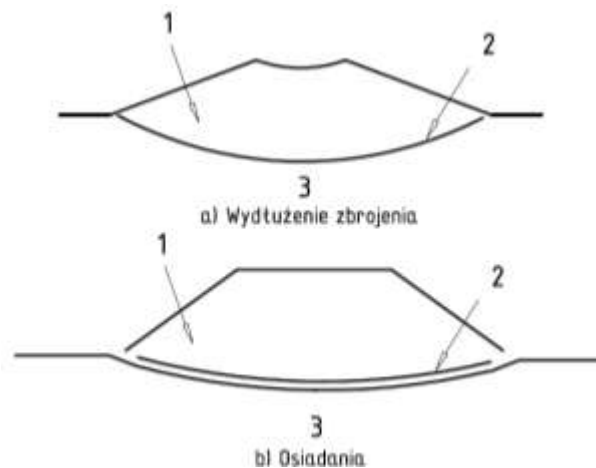


1 - nasyp, 2 - zbrojenie, 3 - słabe podłoże,

4 - zsuw, 5 - poślizg w nasypie, 6 - wyparcie, 7 - głęboka powierzchnia poślizgu

Rysunek 4.1 Stany graniczne nośności dla nasypów wzmocnionych w podstawie [2].

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu



1 - nasyp, 2 - zbrojenie, 3 - słabe podłoże,

Rys. 4.2 Stan graniczny użytkowości dla nasypów wzmocnionych w podstawie [2].

Analiza powyższych stanów granicznych pozwala na określenie maksymalnej siły rozciągającej T_r , na którą należy projektować zbrojenie. Wartość tej siły powinna być:

- większa od maksymalnej, wymaganej siły rozciągającej, określonej z warunku stateczności na obrót T_{ro} ,
- większa od sumy maksymalnej siły rozciągającej, potrzebnej do zapewnienia stateczności na poślizg w nasypie T_{ds} oraz maksymalnej, wymaganej siły rozciągającej zapewniającej konstrukcji stateczność ze względu na wyparcie gruntu spod podstawy nasypu T_{rf} ,

co można zapisać jako: $T_r = \max (T_{ro}; T_{ds} + T_{rf})$

Według normy BS 8006:2010 dla nasypów posadowionych na słabonośnym podłożu należy w pierwszej kolejności sprawdzić warunek nośności długotrwałej dla geometrii nasypu według konwencjonalnych metod (np. Taylor, Bishop, Morgenstern) wykorzystując w obliczeniach efektywne parametry wytrzymałościowe gruntu: c' oraz ϕ' , a następnie warunek nośności krótkotrwałej w warunkach bez drenażu c_u . Dla bardzo słabych gruntów może się okazać, że warunek stateczności nie będzie spełniony mimo zastosowania wzmocnienia. W takim przypadku należy zmienić geometrię nasypu (zmniejszenie pochylenia skarp) i ponownie sprawdzić nośność. Obliczenia należy wykonywać iteracyjnie.

4.1.1. Stateczność lokalna w nasypie (ULS)

Warunek stateczności lokalnej wg BS 8006 polega na sprawdzeniu, czy wytworzy się linia poślizgu powodująca utratę stateczności skarpy (rys. 4.1a). Stateczność skarp zależy od efektywnego kąta tarcia wewnętrznego gruntu zasypowego oraz nachylenia projektowanej skarpy. Należy sprawdzić warunek:

$$\frac{H}{L_s} \leq \frac{\tan\phi'_{cv}}{f_{ms}} \quad (4.1)$$

gdzie:

H – wysokość całkowita nasypu,

L_s – długość pozioma rzutu skarpy nasypu,

$\tan\phi'_{cv}$ – tangens efektywnego kąta tarcia wewnętrznego gruntu nasypowego, przy stałej objętości w stanie krytycznym,

f_{ms} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa stosowany do $\tan\phi'_{cv}$ (patrz tab. 4.2).

4.1.2. Stateczność na obrót (ULS)

Analiza stateczności konstrukcji nasypu na obrót polega na sprawdzeniu, czy wytworzy się linia poślizgu przecinająca zastosowane zbrojenie, powodująca utratę stateczności całej konstrukcji nasypu (rys 4.1b). Sprawdzenia tego warunku może dokonać na wiele sposobów.

Metody równowagi granicznej

Procedura polega na analizie powierzchni poślizgu wzdłuż podstawy nasypu, w celu określenia położenia maksymalnej siły rozciągającej w zbrojeniu, niezbędnej do zapewnienia odpowiedniego zapasu bezpieczeństwa z uwagi na stateczność konstrukcji. Analizę można przeprowadzać stosując efektywne parametry wytrzymałościowe, jednak zaleca się wykonywanie obliczeń opartych o warunki bez drenażu upraszczające analizę i zapewniające wyniki bardziej realne dla nośności krótkotrwałej (stan budowlany).

Maksymalną siłę w zbrojeniu T_{roj} można określić z zależności:

$$T_{roj}Y_j = M_{RRj} = M_{Dj} - M_{RSj} \quad (4.2)$$

Y_j – pionowe ramię momentu dla krytycznej linii poślizgu w punkcie „j” zlokalizowanym wzdłuż podstawy nasypu,

M_{RRj} – moment utrzymujący związany ze zbrojeniem w punkcie „j” zlokalizowanym wzdłuż podstawy nasypu,

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

M_{Dj} – moment destabilizujący (z uwzględnieniem współczynników zwiększających) w punkcie „j” zlokalizowanym wzdłuż podstawy nasypu,

M_{RSj} – moment utrzymujący (z uwzględnieniem współczynników zmniejszających) związany z wytrzymałością gruntu w punkcie „j” zlokalizowanym wzdłuż podstawy nasypu.

Siłę T_{ro} można wyznaczyć analitycznie korzystając z poniższych wzorów, lub wykorzystując np. metody paskowe Janbu i Bishopa.

Moment destabilizujący związany z ciężarem gruntu oraz obciążeniem:

$$M_D = \left[\sum (f_{fs} \cdot W_i + f_q \cdot b_i \cdot w_{si}) \cdot \sin \alpha_i \right] \cdot R_d$$

Moment utrzymujący związany z gruntem:

$$M_{RS} = \sum_{i=1}^n \frac{\left[\frac{c^{b_i}}{f_{ms}} + (f_{fs} \cdot W_i + f_q \cdot b_i \cdot w_{si})(1 - r_u) \frac{\tan \phi'_{cvi}}{f_{ms}} \right] \cdot \sec \alpha_i \cdot R_d}{1 + \frac{\tan \phi'_{cvi} \cdot \tan \alpha_i}{f_{ms}}}$$

Moment utrzymujący związany ze zbrojeniem:

$$M_{RR} = T_{ro} \cdot Y$$

gdzie:

f_{fs} – częściowy współczynnik dla ciężaru gruntu (patrz tab. 4.2),

f_q – częściowy współczynnik dla obciążeń zewnętrznych (patrz tab. 4.2),

W_i – ciężar pojedynczego „paska” (patrz rys. 4.3),

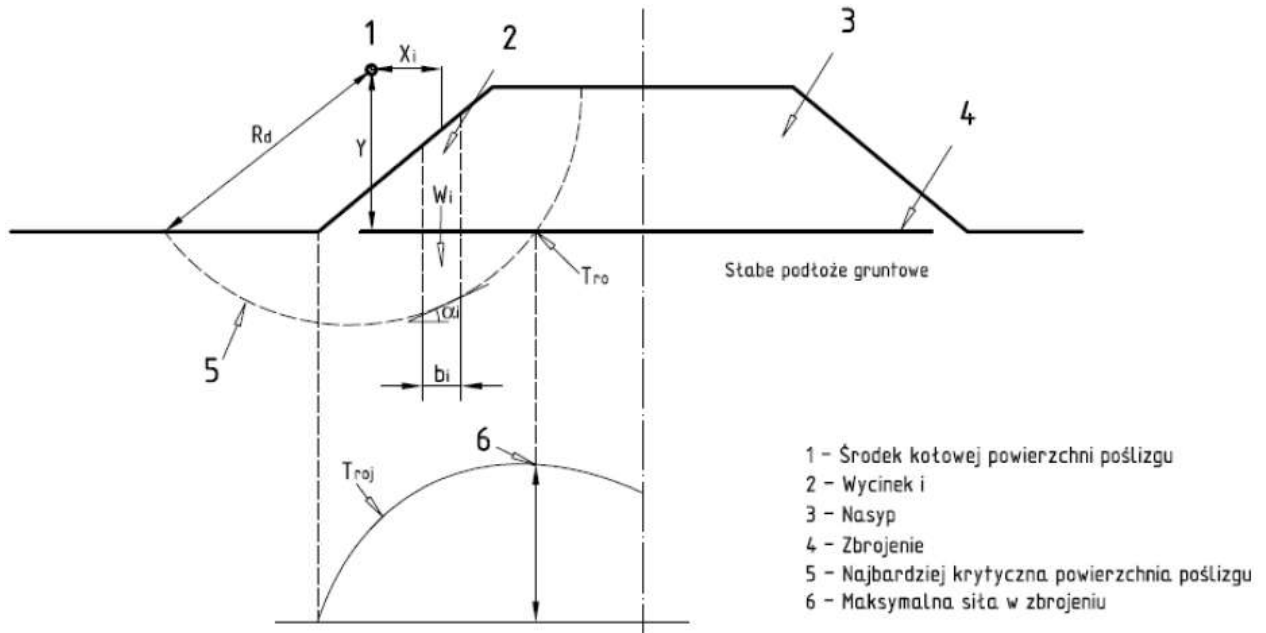
b_i – szerokość pojedynczego „paska” (patrz rys. 4.3),

w_{si} – obciążenie użytkowe korony nasypu dla danego „paska”,

R_d – promień kołowej linii poślizgu (patrz rys. 4.3),

c^{b_i} – spójność efektywna gruntu dla danego „paska” o szerokości b_i (patrz rys. 4.3),

r_u – współczynnik ciśnienia w porach gruntu.



Rysunek 4.3 Przypadek wykorzystania metody analizy powierzchni poślizgu do określenia maksymalnej siły rozciągającej w zbrojeniu [2].

Potrzebną długość zakotwienia zbrojenia wewnątrz strefy poślizgu L_j (na 1 mb) można wyznaczyć z poniższej zależności:

$$f_n \cdot f_p \cdot T_{roj} \leq \gamma \cdot h \cdot \frac{a' \cdot \tan \phi'_{cv}}{f_{ms}} \cdot L_j + \frac{a'_{bc} \cdot c_u}{f_{ms}} \cdot L_j \quad (4.3)$$

gdzie:

f_n – częściowy współczynnik dla ciężaru gruntu (patrz tab. 4.3),

f_p – częściowy współczynnik dla obciążeń zewnętrznych (patrz tab. 4.2),

c_u – wytrzymałość na ścinanie słabonośnego podłoża gruntowego, przyległego do zbrojenia w warunkach bez drenażu,

h – wysokość nasypu nad zbrojeniem na odcinku L_j .

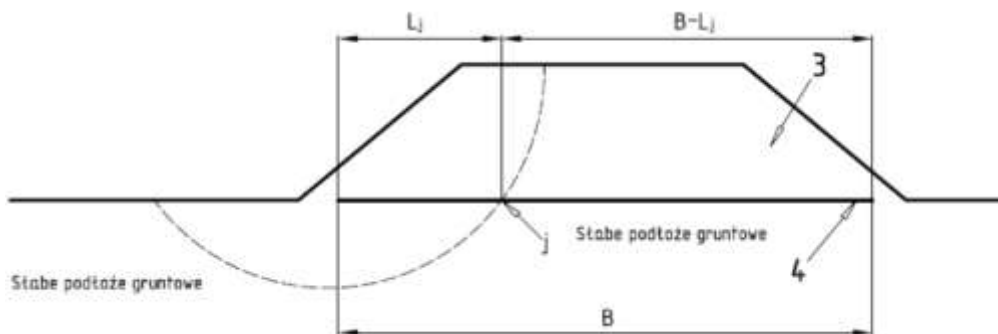
a' – współczynnik współpracy związany z wzajemnym oddziaływaniem grunt/zbrojenie przyjmowany w odniesieniu do $\tan \phi'_{cv}$, którego wartość należy określać w zależności od rodzaju zastosowanego geosyntetyku oraz kąta tarcia wewnętrznego zastosowanego gruntu (otrzymywany z badania oporu na wyciąganie geosyntetyku z gruntu, tzw. „pull-out test”, przy czym dla geosyntetyków tkanych można przyjąć, że $a' = 0,75$) [17],

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

a'_{bc} – współczynnik współpracy związany z wzajemnym oddziaływaniem grunt/zbrojenie ze względu na c_u (określany również z badań wytrzymałości na wyciąganie geosyntetyku, który w przypadku braku danych można przyjmować równy współczynnikowi określanemu ze względu na $\tan\phi'_{cv}$, czyli $a'_{bc} = a'$).

Zagadnienie mechanizmu współpracy zbrojenia odkształcalnego z otaczającym gruntem opisano w paragrafie 2.4 niniejszego skryptu. Szczegółowe informacje można znaleźć np. w [17] i [7]. W normie BS8006 [2] podkreślono, że należy bardzo ostrożnie dobierać wartość współczynnika współpracy ze względu na przyczepność zbrojenie/podłoże gruntowe a'_{bc} ponieważ ma ona związek nie tylko z właściwościami powierzchni zbrojenia, ale również zgodnością odkształceń zbrojenia z odkształceniami występującymi w podłożu gruntowym.

Wymagana długość zakotwienia poza strefą poślizgu może być określana w prosty sposób poprzez zastąpienie we wzorze (4.3) L_j przez $B - L_j$ (rys. 4.4).



Rysunek 4.4 Wymagana długość zakotwienia zbrojenia określona przez punkt „j” położony na najbardziej niekorzystnej kołowej linii poślizgu przecinającej zbrojenie nasypu [2].

Analiza uplastycznienia

Analiza uplastycznienia umożliwia wstępne określenie geometrii nasypu w oparciu o parametry wytrzymałościowe podłoża gruntowego. W procedurze analitycznej rozgranicza się dwa przypadki: liniowy wzrost wartości parametrów wytrzymałościowych wraz z głębokością oraz stałą wartość parametrów w przypadku stosunkowo niedużej, ograniczonej miąższości warstwy gruntów słabonośnych.

Analiza metodą elementów oraz różnic skończonych

Dla złożonych warunków gruntowych, szczególnie podczas występowania gruntów ściśliwych o małej wytrzymałości, zalecana jest analiza komputerowa z wykorzystaniem oprogramowania bazującego na metodach elementów skończonych, która pozwala na uwzględnienie wpływu osiadań na pracę zbrojenia lub całego nasypu.

Aby uzyskać realistyczne wyniki analiz przeprowadzanych metodą elementów bądź różnic skończonych, muszą być zachowane dwa warunki: poprawne modelowanie oraz ostrożne przyjmowanie paramentów gruntowych.

4.1.3 Poślizg skarpy po powierzchni zbrojenia (ULS)

Zbrojenie podstawy ma za zadanie m.in. zapobiegać poziomemu wypychaniu na zewnątrz gruntu zasypowego. Należy sprawdzić czy wystąpić może zniszczenie konstrukcji w skutek poślizgu gruntu nasypowego po powierzchni zbrojenia (rys. 4.1c). Analiza przeprowadzana jest w oparciu o efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu nasypowego. Umożliwia określenie wymaganej wytrzymałości zbrojenia na rozciąganie oraz minimalnej długości jego zakotwienia.

Maksymalna siła rozciągająca w zbrojeniu na krawędzi korony nasypu (patrz rys. 4.5) określana jest ze wzoru:

$$T_{ds} = 0,5 \cdot K_a \cdot H \cdot (f_{fs} \cdot \gamma \cdot H + 2 \cdot f_q \cdot w_s) \quad (4.4)$$

gdzie:

K_a – współczynnik parcia czynnego $\left(\tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'_{cv}}{2} \right) \right)$,

H – wysokość nasypu,

γ – ciężar gruntu zasypowego,

w_s – obciążenie użytkowe korony nasypu

f_{fs} – częściowy współczynnik dla ciężaru gruntu (patrz tab. 4.2),

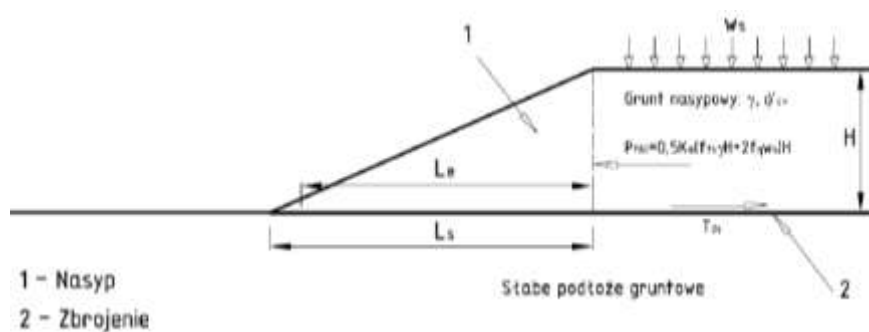
f_q – częściowy współczynnik dla obciążeń zewnętrznych (patrz tab. 4.2),

Minimalna długość zakotwienia zbrojenia w nasypie określana jest natomiast z zależności:

$$L_e \geq \frac{0,5 \cdot K_a \cdot H \cdot (f_{fs} \cdot \gamma \cdot H + 2 \cdot f_q \cdot w_s) \cdot f_s \cdot f_n}{\gamma \cdot h \cdot \frac{a' \cdot \tan \phi'_{cv}}{f_{ms}}} \quad (4.5)$$

gdzie:

- f_s – częściowy współczynnik poślizgu po powierzchni zbrojenia (patrz tab. 4.2),
- f_n – częściowy współczynnik uwzględniający ekonomiczne konsekwencje zniszczenia (patrz tab. 4.3),
- h – średnia wysokość nasypu nad zbrojeniem na długości zakotwienia L_e .

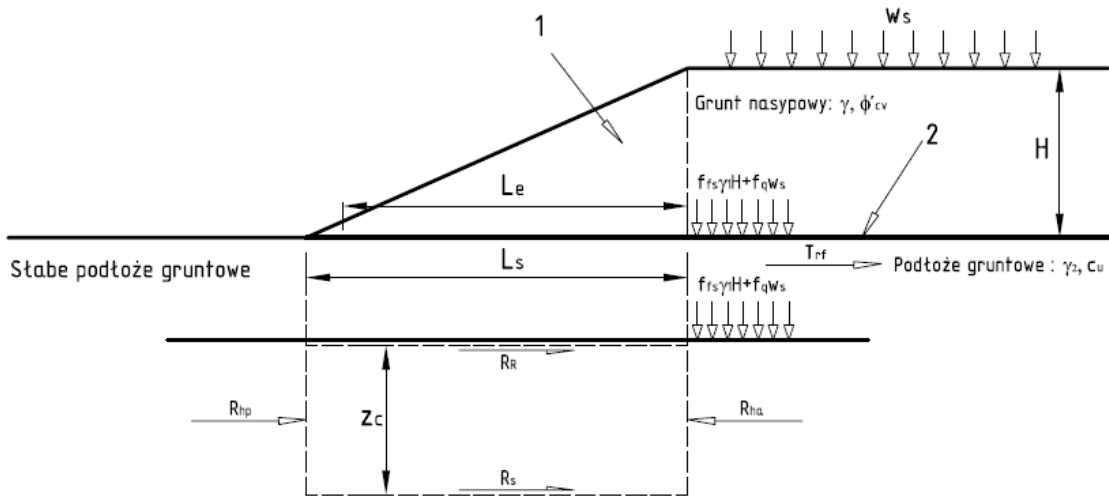


Rysunek 4.5 Stateczność na poślizg gruntu nasykowego po zbrojeniu według BS 8006 [2]

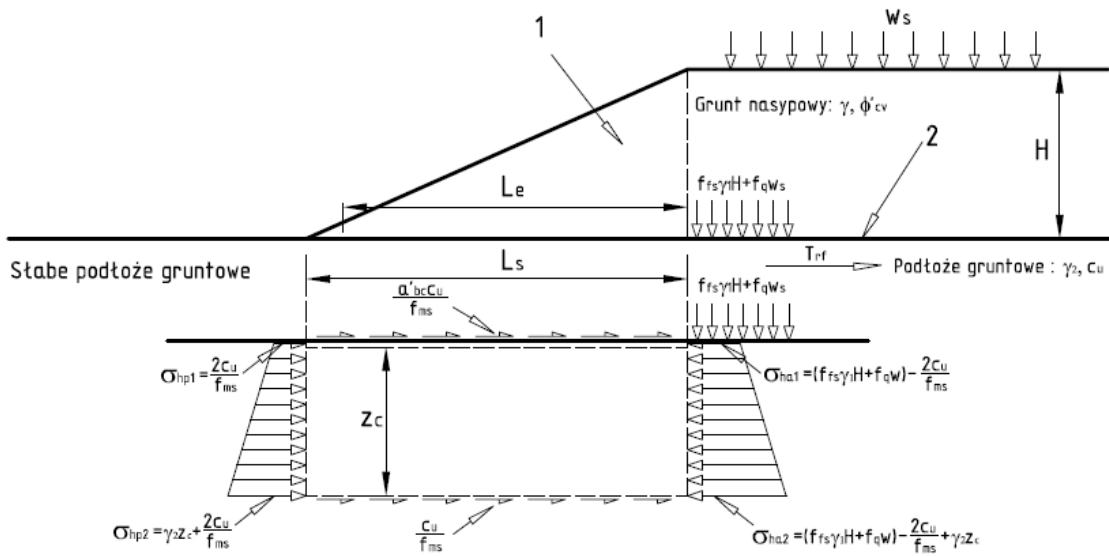
4.1.4. Wyparcie gruntu spod podstawy (ULS)

Wyparcie gruntu spod podstawy nasypu (rys. 3.19d) może wystąpić szczególnie w gruntach słabonośnych o ograniczonej miąższości w początkowej fazie wykonywania nasypu. Aby zapobiec wystąpieniu tego stanu granicznego, przemieszczenie podłoża na zewnątrz nasypu powinno zostać ograniczone przez boczne „skrępowanie” na wystarczająco dużej powierzchni spodniej strony zbrojenia. Należy spełnić dwa warunki:

1. globalna wytrzymałość na ścinanie na spodniej stronie zbrojenia powinna być wystarczająca by przeciwdziałać bocznym obciążeniom wywołanych w podłożu gruntowym;
2. zbrojenie podstawy powinno mieć wystarczającą wytrzymałość na rozciąganie aby przenieść obciążenia rozciągające wywołane przez naprężenia ścinające przekazywane z podłoża gruntowego.



a) Siły występujące w analizie stateczności na wyparcie podłoża gruntowego



b) Analiza stateczności na wyparcie podłoża gruntowego w warunkach bez drenażu

1 - Nasyp
2 - Zbrojenie

Rysunek 4.6 Analiza stateczności na wyparcie podłoża [2].

Aby zapobiec wyparciu podłoża, powinien być spełniony poniższy warunek (patrz rys. 4.6a) sił poziomych (z uwzględnieniem współczynników częściowych):

$$R_{ha} \leq R_{hp} + R_s + R_r \quad (4.6)$$

gdzie:

R_{ha} - siła powodująca wyparcie podłoża,

R_{hp} - siła związana z odporem gruntu w podłożu,

R_s - siła związana z wytrzymałością podłoża na ścinanie na głębokości z_c ,

R_r - siła związana z wytrzymałością podłoża na ścinanie na dolnej stronie zbrojenia.

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

Analiza stateczności przeprowadzana jest z wykorzystaniem parametrów gruntowych w warunkach bez odpływu, a jej celem jest określenie wymaganej długości skarp nasypu L_S oraz siły rozciągającej T_{rf} , wywołanej w zbrojeniu podstawy.

W przypadku ograniczonej miąższości warstwy słabej oraz stałej wartości wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez drenażu, minimalna wymagana długość podstawy skarpy L_S określana jest ze wzoru:

$$L_S \geq \frac{(f_{fs} \cdot \gamma_1 \cdot H + f_q \cdot w_s - \frac{4c_u}{f_{ms}}) \cdot z_c}{\frac{(1 + a'_{bc}) \cdot c_u}{f_{ms}}} \quad (4.7)$$

gdzie:

f_{fs} – częściowy współczynnik dla ciężaru gruntu (patrz tab. 4.2),

γ_1 – ciężar gruntu nasypowego,

H – maksymalna wysokość nasypu,

f_q – częściowy współczynnik dla obciążeń zewnętrznych (patrz tab. 4.2),

w_s – obciążenie użytkowe korony nasypu,

c_u – wytrzymałość na ścinanie słabego podłoża w warunkach bez drenażu,

f_{ms} – częściowy współczynnik stosowany do c_u (patrz tabela 4.2),

z_c – miąższość słabego podłoża gruntowego, ograniczonego z dołu gruntem nośnym w przypadku, gdy wartość jego wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez drenażu nie zmienia się wraz z głębokością, przy czym zakłada się, że analiza przeprowadzana jest dla z_c nie większej niż podwójna wysokość projektowanego nasypu,

a'_{bc} – współczynnik związany z przyczepnością grunt/zbrojenie ze względu na c_u .

Podobna zależność występuje dla podłoża gruntowego, którego wytrzymałość na ścinanie rośnie liniowo wraz z głębokością. Minimalna wymagana długość podstawy skarpy L_S zależna od krytycznej głębokości z_c pod powierzchnią terenu i określana jest ze wzoru:

$$L_S \geq \frac{[f_{fs} \cdot \gamma_1 \cdot H + f_q \cdot w_s - \frac{(2c_u + z_c \rho) \cdot 2}{f_{ms}}] \cdot z_c}{\frac{c_u \cdot (a'_{bc} + 1) + \rho \cdot z_c}{f_{ms}}} \quad (4.8)$$

gdzie:

z_c – krytyczna głębokość określana wg wzoru:

$$z_c = \sqrt{\frac{(1+a'_{bc})c_u \cdot n \cdot H}{2 \cdot \rho}}$$

n – nachylenie zbocza nasypu,

ρ – wzrost wytrzymałości na ścinanie na jednostkę głębokości (np. wzrost w funkcji liniowej).

Siła rozciągająca T_{rf} wywołana w zbrojeniu podstawy, wynikająca z działania naprężeń ścinających obliczana jest ze wzoru:

$$T_{rf} = \frac{a'_{bc} \cdot c_{uo} \cdot L_e}{f_{ms}} \quad (4.9)$$

gdzie:

L_e – wymagana długość zakotwienia zbrojenia w podstawie skarpy nasypu,

c_{uo} – wytrzymałość na ścinanie podłoża gruntowego w warunkach bez drenażu na spodniej stronie zbrojenia.

4.1.5 Nośność podłoża gruntowego (ULS)

W przypadku nasypów posadowionych na słabym podłożu, decydującą rolę odgrywa zazwyczaj stateczność konstrukcji na wyparcie, a nie nośność podłoża gruntowego. Opór graniczny podłoża według normatywów brytyjskich można obliczyć korzystając z norm BS 8004 [1] i BS EN 1997-1 (brytyjski Eurokod 7), przyjmując podejście obliczeniowe DA 1 dla dwóch kombinacji częściowych współczynników bezpieczeństwa, w których współczynniki stosuje się do oddziaływań oraz do parametrów wytrzymałościowych gruntu.

Tabela 4.1 Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla stanu GEO i STR wg [21]

współczynnik	Kombinacja 1: A1+M1+R1	Kombinacja 2: A2+M2+R1
γ_G	1,35	1,0
γ_Q	1,5	1,3
γ_φ	1,0	1,25
γ_{cI}	1,0	1,25
γ_{cu}	1,0	1,4
γ_γ	1,0	1,0
γ_R	1,0	1,0

4.1.6. Stateczność ogólna (ULS)

Należy sprawdzić czy w podłożu gruntowym wytworzy się „głęboka” powierzchnia poślizgu (rys.4.1e) lub wystąpi poślizg blokowy, powodujący utratę stateczności podłoża gruntowego i konstrukcji nasypu jako całości. W normie BS 8006:2010 zaleca się wykonać w tym przypadku konwencjonalną analizę powierzchni poślizgu, stosując odpowiednie, częściowe współczynniki.

4.1.7. Nadmierne odkształcenia (wydłużenie) zbrojenia (SLS)

Warunek ten (rys. 4.2a) polega na sprawdzeniu jakiego wydłużenia dozna zbrojenie geosyntetyczne pod wpływem działania sił rozciągających oraz porównaniu tych wartości z dopuszczalnymi dla danego typu konstrukcji.

W normie brytyjskiej przyjęto, że maksymalne odkształcenia ε_{max} w zbrojeniu podstawy nie powinny przekraczać wartości 5% dla zastosowań krótkoterminowych oraz od 5 do 10% dla zastosowań długoterminowych.

4.1.8. Osiedania nasypu (SLS)

Należy określić wartość osiadań nasypu (rys. 4.2b) (jak również nierównomierność osiadań) oraz porównać ją z wartością dopuszczalną, zależną od charakteru projektowanej konstrukcji.

4.1.9. Dobór geosyntetyku

Warunek stanu granicznej nośności określonego ze względu na możliwość rozerwania zbrojenia polega na sprawdzeniu poniższej nierówności:

$$\frac{T_d}{f_n} > T_r \quad (4.10)$$

gdzie:

T_d – projektowa wartość wytrzymałości zbrojenia na rozciąganie,

T_r – maksymalna siła rozciągająca z analizy stanów granicznych,

f_n – częściowy współczynnik bezpieczeństwa związany z ekonomicznymi konsekwencjami wystąpienia zniszczenia (patrz tabela 4.2).

Projektowa wartość wytrzymałości zbrojenia T_d określana jest poprzez sprawdzenie dwóch poniższych warunków, przy czym oba warunki powinny być spełnione jednocześnie:

- zbrojenie nie powinno przekroczyć warunków stanu granicznego nośności, tzn. ulec zniszczeniu przed upływem czasu, na który została zaprojektowana konstrukcja,
- zbrojenie nie powinno przekroczyć warunków stanu granicznego użyteczności, tzn. pęczanie zbrojenia, a co za tym idzie dopuszczalne wydłużenie zbrojenia powinno mieścić się w określonym zakresie przed upływem czasu, na który została zaprojektowana konstrukcja.

Podstawowa wartość wytrzymałości zbrojenia T_B :

- dla stanu granicznego nośności: $T_B = T_{CR} = \frac{T_{char}}{RF_{CR}}$
- dla stanu granicznego użyteczności: $T_B = T_{CS}$

gdzie:

T_{CR} – wytrzymałość na zerwanie w wyniku pęczania w określonym czasie i temperaturze,

T_{char} – charakterystyczna krótkoterminowa wytrzymałość zbrojenia geosyntetycznego,

T_{CS} – wytrzymałość, która powoduje ograniczenie odkształceń w zbrojeniu,

RF_{CR} – współczynnik redukcyjny uwzględniający pęczanie, określony zgodnie z ISO/TR 20432 [18] lub zaleceniami producenta.

Projektowa wartość wytrzymałości zbrojenia T_D :

- dla stanu granicznego nośności: $T_D = \frac{T_{CR}}{f_m}$
- dla stanu granicznego użyteczności: $T_D = \frac{T_{CS}}{f_m}$

gdzie:

f_m – materiałowy współczynnik bezpieczeństwa, określony zgodnie z ISO/TR 20432 [18] lub zaleceniami producenta,

$$f_m = RF_{ID} \cdot RF_W \cdot RF_{CH} \cdot f_s$$

RF_{ID} – współczynnik redukcyjny uwzględniający uszkodzenia podczas wbudowywania,

RF_W – współczynnik redukcyjny uwzględniający starzenie się w warunkach atmosferycznych,

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

RF_{CH} – współczynnik redukcyjny uwzględniający oddziaływania chemiczne/środowiskowe,

f_s – współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający ekstrapolację danych.

4.1.10. Współczynniki częściowe do obliczeń według BS 8006:2010

Tabela 4.2 Zestawienie częściowych współczynników bezpieczeństwa [2]

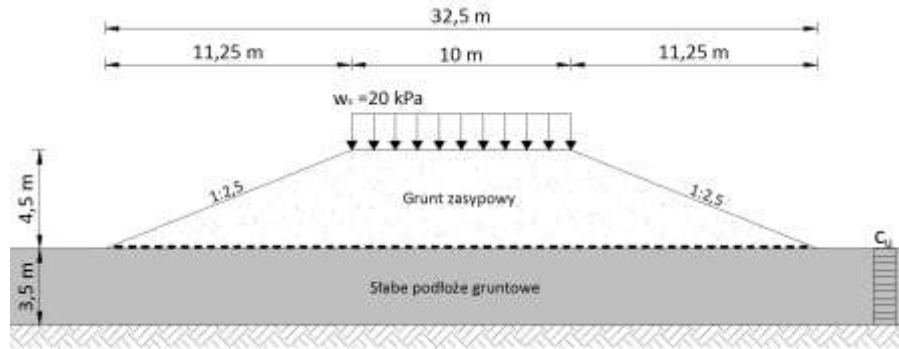
	Współczynnik częściowy	Stan graniczny nośności	Stan graniczny użyteczności
Współczynniki obciążenia	Ciężar gruntu, np. grunt nasypowy Obciążenie stałe, np. obciążenie liniowe lub skupione Obciążenie użytkowe, np. obciążenie ruchem pojazdów	$f_{fs}=1,3$ $f_f=1,2$ $f_q=1,3$	$f_{fs}=1,0$ $f_f=1,0$ $f_q=1,0$
Współczynniki materiałowe gruntu	Stosowany do: $\tan\varphi'_{cv}$ c' c_u	$f_{ms}=1,0$ $f_{ms}=1,6$ $f_{ms}=1,0$	$f_{ms}=1,0$ $f_{ms}=1,0$ $f_{ms}=1,0$
Współczynniki materiałowe zbrojenia	Stosowany do podstawowej wytrzymałości zbrojenia	Wartość f_m zależy od rodzaju zbrojenia i projektowanego okresu użytkowania	
Współczynniki współpracy grunt/zbrojenie	Poślizg po powierzchni zbrojenia Opór zbrojenia na wyciąganie	$f_s=1,3$ $f_p=1,3$	$f_s=1,0$ $f_p=1,0$

Tabela 4.3 Kategorie konstrukcji ze względu na prawdopodobieństwo zniszczenia [2]

Kategoria	Współczynnik częściowy f_n	Przykłady konstrukcji
1 (niskie)	1,0,	Ściany oporowe i zbocza utrzymujące uskok naziomu o wysokości < 1,5 m, w przypadku których awaria spowodowałaby minimalne uszkodzenia
2 (średnie)	1,0	Nasypy i konstrukcje, w przypadku których zniszczenie charakteryzuje się umiarkowanymi uszkodzeniami
3 (wysokie)	1,1	Przyczółki i konstrukcje autostrad, dróg ekspresowych i głównych lub dróg kolejowych; budynki mieszkalne, zapory, falochrony, umocnienie brzegów rzek

4.2. Przykład obliczeniowy

Dane wejściowe do obliczeń



Rysunek 4.7 Geometria konstrukcji nasypu

Tabela 4.4 Zestawienie parametrów gruntowych wykorzystanych do obliczeń

Parametry gruntowe	Ciężar objętościowy	Parametry wytrzymałościowe gruntu w warunkach z odpływem		Parametry wytrzymałościowe gruntu w warunkach bez odpływu	
		φ'	c'	φ_u	c_u
Grunt zasypowy (MSa)	$\gamma_{1,k}=18,5\text{kN/m}^3$	$\varphi'_{1,k}=32^\circ$	$c'_{1,k}=0,0\text{ kPa}$	-	-
Słabe podłoże gruntowe (Or)	$\gamma_{2,k}=13\text{kN/m}^3$	$\varphi'_{2,k}=11^\circ$	$c'_{1,k}=8,0\text{ kPa}$	$\varphi_{u,2,k}=0^\circ$	$c_{u,2,k}=15,5\text{kPa}$

Stateczność lokalna w nasypie

$$\frac{H}{L_s} = \frac{1}{n} \leq \frac{\tan\phi'_{cv}}{f_{ms}}$$

gdzie:

$$H = 4,5 [m]$$

$$L_s = 11,25 [m]$$

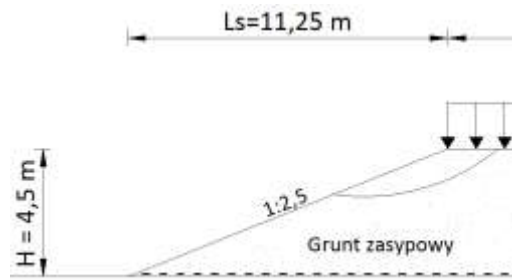
$$\tan\phi'_{cv} = \tan 32^\circ = 0,625 [-]$$

$$f_{ms} = 1,0$$

$$\frac{4,5}{11,25} = \frac{1}{2,5} = 0,4 [-] \leq \frac{\tan 32^\circ}{1,0} = 0,625 [-]$$

warunek został spełniony

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu



Rysunek 4.8 Stateczność lokalna w nasypie

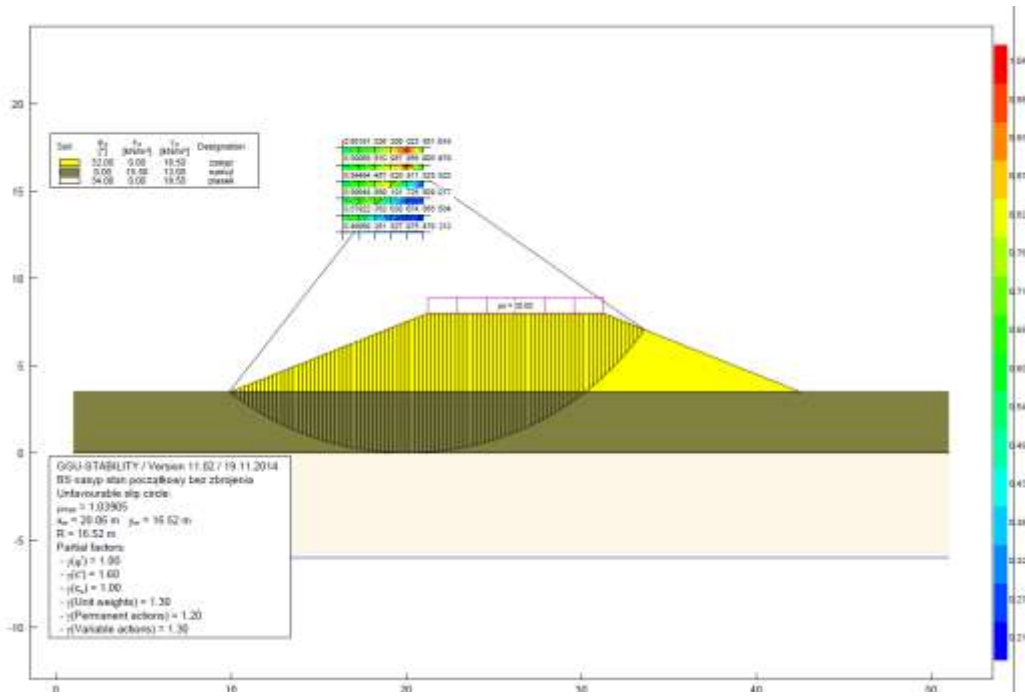
Stateczność na obrót / stateczność ogólna

W wytycznych angielskich zaleca się przeanalizowanie stateczności na obrót oraz stateczności ogólnej. Różnica polega na zasięgu kołowej powierzchni poślizgu, wzdłuż których dochodzi do utraty stateczności (rys. 4.1b, e).

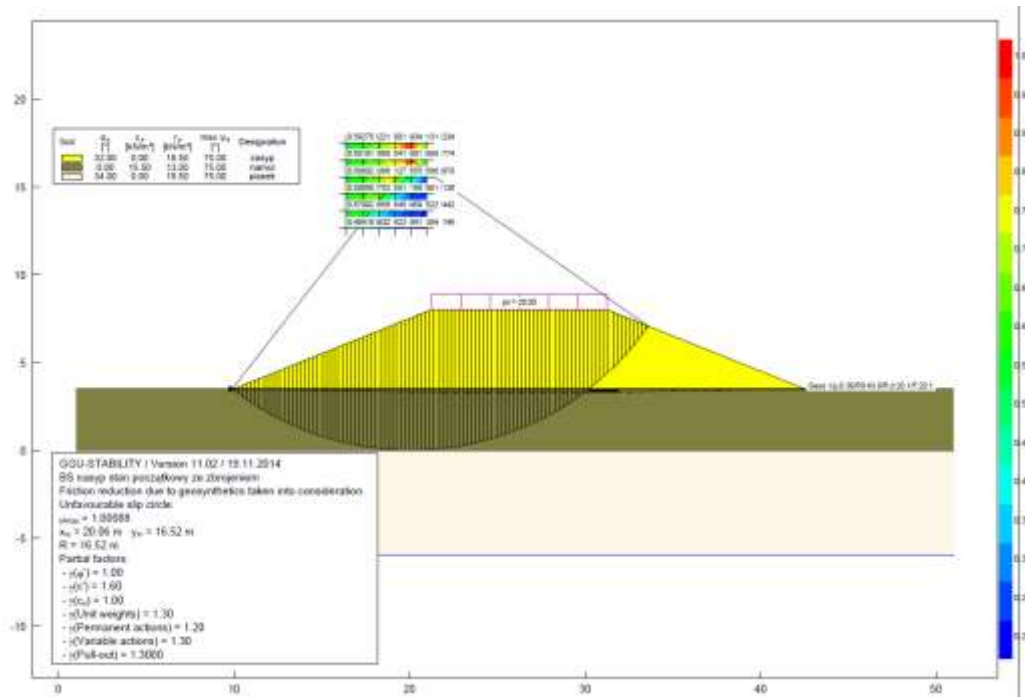
Analizę stateczności na obrót przeprowadzono dla stanu początkowego i końcowego wykorzystując program komputerowy GGU Stability. Obliczenia wykonywano metodą Bishopa, stosując częściowe współczynniki bezpieczeństwa według BS 8006 (tab. 4.1).

Wyniki analizy:

- stan początkowy (dla parametrów w warunkach bez drenażu), brak zbrojenia geosyntetycznego (rys. 4.9) - współczynnik wykorzystania: $\mu = 1,04$ - konstrukcja niestateczna,
- stan początkowy, konstrukcja ze zbrojeniem (rys. 4.10) - przyjmowano iteracyjnie wartość siły w geosyntetyku, tak by uzyskać wartość współczynnika wykorzystania: $\mu = \frac{E_M}{R_M} = 1$ - wymagana siła długoterminowa w geosyntetyku - 20,1 kN/m,
- stan końcowy (dla parametrów efektywnych), bez zbrojenia geosyntetycznego (rys. 4.11) - współczynnik wykorzystania: $\mu = 0,62$ - konstrukcja stateczna bez konieczności stosowania zbrojenia geosyntetycznego w podstawie projektowanego nasypu.

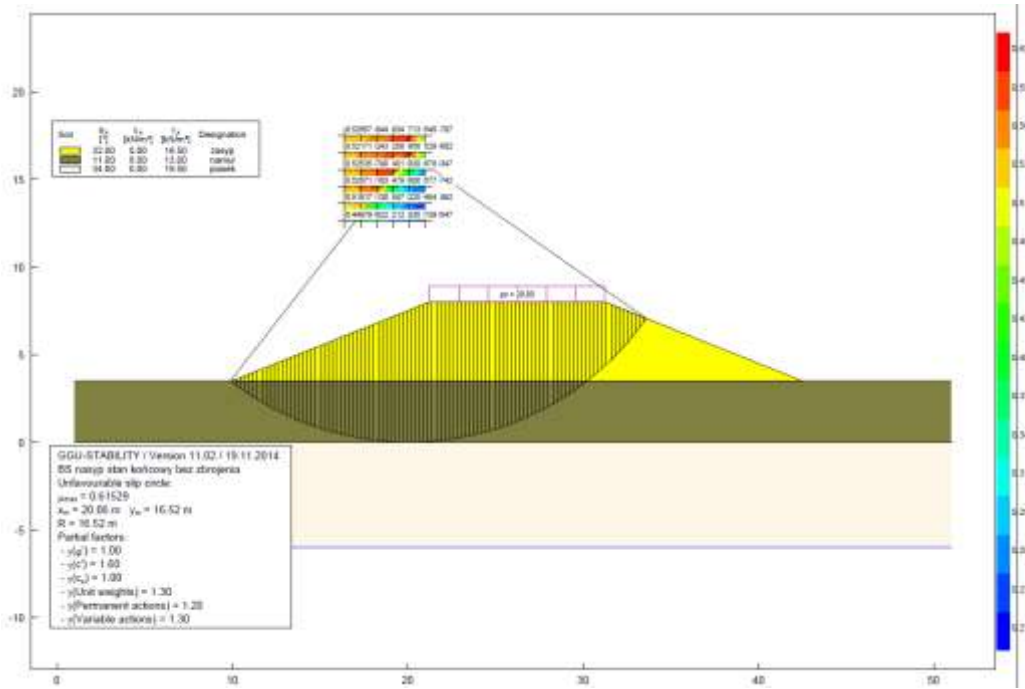


Rysunek 4.9 Stateczność na obrót - stan początkowy bez zbrojenia



Rysunek 4.10 Stateczność o na obrót - stan początkowy ze zbrojeniem

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu



Rysunek 4.11 Stateczność na obrót - stan końcowy konstrukcji bez zbrojenia

Siła w zbrojeniu niezbędna do zapewnienia stateczności w punkcie 'j', określona z analizy kołowych linii poślizgu w programie GGU Stability wyniosła: $T_{roj} = 20,1 \left[\frac{kN}{mb} \right]$.

Potrzebna długość zakotwienia zbrojenia wewnątrz strefy poślizgu określona z analizy kołowych linii poślizgu w programie GGU Stability dla wartości charakterystycznych wyniosła: $L_j = 20,2 [m]$

Określenie wymaganej siły w zbrojeniu - sprawdzenie warunku (3.15):

$$f_n \cdot f_p \cdot T_{roj} \leq \gamma \cdot h \cdot \frac{a \cdot \tan \phi'_{cv}}{f_{ms}} L_j + \frac{a'_{bc} \cdot c_u}{f_{ms}} \cdot L_j$$

$$1,1 \cdot 1,3 \cdot T_{roj} \leq 18,5 \cdot 4,5 \cdot \frac{0,75 \cdot \tan 32^\circ}{1,0} \cdot 20,2 + \frac{0,75 \cdot 15,5}{1,0} \cdot 20,2$$

$$1,43 \cdot T_{roj} \leq 1022,93$$

$$T_{roj} \leq 715,34 \text{ kN/m}$$

$$T_{roj} = 20,1 \text{ kN/m} \leq 715,34 \text{ kN/m}$$

warunek został spełniony, nie dojdzie do utraty stateczności na obrót.

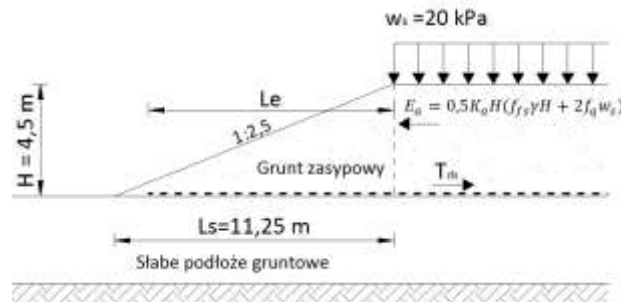
Określenie minimalnej długości zakotwienia dla otrzymanej siły T_{roj} :

$$L_j \geq f_n \cdot f_p \cdot T_{roj} \left(\frac{f_{ms}}{\gamma \cdot h \cdot a' \cdot \tan \phi'_{cv}} + \frac{f_{ms}}{a'_{bc} \cdot c_u} \right)$$

$$L_j \geq 1,1 \cdot 1,3 \cdot 20,1 \left(\frac{1,0}{18,5 \cdot 4,5 \cdot 0,75 \cdot \tan 32^\circ} + \frac{1,0}{0,75 \cdot 15,5} \right)$$

$$L_j \geq 3,21 \text{ m}$$

Poślizg skarpy po powierzchni zbrojenia



Rysunek 4.12 Poślizg skarpy po powierzchni zbrojenia

Maksymalna siła rozciągająca w zbrojeniu:

$$T_{ds} = 0,5 \cdot K_a \cdot H \cdot (f_{fs} \cdot \gamma \cdot H + 2 \cdot f_q \cdot w_s)$$

$$= 0,5 \cdot 0,307 \cdot 4,5 \cdot (1,3 \cdot 18,5 \cdot 4,5 + 2 \cdot 1,3 \cdot 20) = 110,66 \text{ kN/m}$$

gdzie: $K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'_{cv}}{2} \right) = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{32^\circ}{2} \right) = 0,307 [-]$

Minimalna długość zakotwienia zbrojenia w nasypie:

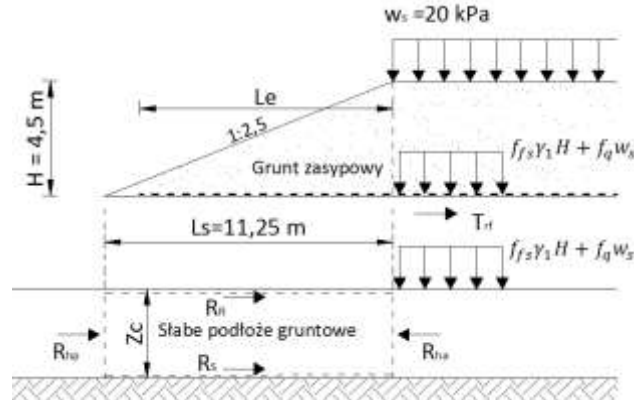
$$L_e \geq \frac{0,5 \cdot K_a \cdot H \cdot (f_{fs} \cdot \gamma \cdot H + 2 \cdot f_q \cdot w_s) \cdot f_s \cdot f_n}{\gamma \cdot h \cdot \frac{a' \cdot \tan \phi'_{cv}}{f_{ms}}} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 0,307 \cdot 4,5 \cdot (1,3 \cdot 18,5 \cdot 4,5 + 2 \cdot 1,3 \cdot 20) \cdot 1,3 \cdot 1,1}{18,5 \cdot 2,25 \cdot \frac{0,75 \cdot \tan 32^\circ}{1,0}} = 8,11 \text{ m}$$

Przyjęto: $L_e = 8,11 \text{ m}$ oraz $T_{ds} = 110,66 \text{ kN/m}$

Wyparcie gruntu spod podstawy

Analiza stateczności na wyparcie przeprowadzana została dla ograniczonej miąższości warstwy słabej oraz stałej wartości wytrzymałości na ścinanie.



Rysunek 4.13 Wyparcie gruntu spod podstawy nasypu

Minimalna wymagana długość podstawy skarpy L_s :

$$L_s \geq \frac{\left(f_{fs} \cdot \gamma_1 \cdot H + f_q \cdot w_s - \frac{4c_u}{f_{ms}}\right) \cdot z_c}{\frac{(1 + a'_{bc}) \cdot c_u}{f_{ms}}} = \frac{\left(1,3 \cdot 18,5 \cdot 4,5 + 1,3 \cdot 20 - \frac{4 \cdot 15,5}{1,0}\right) \cdot 3,5}{\frac{(1 + 0,75) \cdot 15,5}{1,0}} = 9,32 \text{ m}$$

ponieważ $L_s = 11,25 \text{ m} \geq 9,32 \text{ m}$, nie dojdzie do wyparcia gruntu spod podstawy nasypu.

Siła rozciągająca T_{rf} wywołana w zbrojeniu podstawy:

$$T_{rf} = \frac{a'_{bc} \cdot c_{uo} \cdot L_e}{f_{ms}} = \frac{0,75 \cdot 15,5 \cdot 8,12}{1,0} = 94,4 \text{ kN/m}$$

Przyjęto: $L_s = 11,25 \text{ m}$ oraz $T_{rf} = 94,4 \text{ kN/m}$

Nośności podłoża gruntowego

Według zaleceń brytyjskich opór graniczny podłoża gruntowego określa się zgodnie z zasadami podanymi w Eurokodzie 7, przyjmując podejście obliczeniowe DA 1.

Nośność dla stanu początkowego:

$$E_d \leq R_d$$

Opór podłoża w warunkach bez odpływu:

$$R' = b' \cdot (\pi + 2) \cdot c_u$$

Kombinacja 1:

$$R' = 32,5 \cdot (\pi + 2) \cdot 15,5 = 2590,08 \text{ kN/m}$$

wstępnie założono wykonanie w pierwszym etapie nasypu o wysokości 1,9 m

$$\begin{aligned} E_d &= \gamma_G \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot b' + \gamma_Q \cdot q_k \cdot b' = 1,35 \cdot 1,9 \cdot 18,5 \cdot 32,5 + 1,5 \cdot 20 \cdot 32,5 \\ &= 2517,21 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$2517,21 \text{ kN/m} \leq 2590,08 \text{ kN/m}$ warunek spełniony dla nasypu o wysokości 1,9 m.

Kombinacja 2:

$$c_{ud} = \frac{c_{uk}}{\gamma_{cu}} = \frac{15,5}{1,40} = 11,07 \text{ kPa}$$

$$R' = b' \cdot (\pi + 2) \cdot c_{ud} = 32,5 \cdot (\pi + 2) \cdot 11,07 = 1849,82 \text{ kN/m}$$

dla $h_1 = 1,6 \text{ m}$

$$\begin{aligned} E_d &= \gamma_G \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot b' + \gamma_Q \cdot q_k \cdot b' = 1,0 \cdot 1,6 \cdot 18,5 \cdot 32,5 + 1,3 \cdot 20 \cdot 32,5 \\ &= 1807,0 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$1807,0 \text{ kN/m} \leq 1849,82 \text{ kN/m}$ warunek spełniony dla nasypu o wysokości 1,6 m.

Ostatecznie stwierdzono, że aby warunek nośności słabego podłoża pod nasypem był spełniony w początkowej fazie budowy (dla parametrów gruntowych w warunkach bez drenażu) można wykonać nasyp o maksymalnej wysokości 1,6 m.

Nośność dla stanu końcowego:

Opór podłoża:

$$R' = b' \cdot (c' \cdot N_c + q' \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot b' \cdot N_\gamma)$$

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

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \varphi$$

Kombinacja 1:

$$N_q = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{11^\circ}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan 11^\circ} = 2,710$$

$$N_c = \frac{(2,71 - 1)}{\tan 11^\circ} = 8,797$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (2,71 - 1) \cdot \tan 11^\circ = 0,665$$

$$R' = 32,5 \cdot (8,0 \cdot 8,797 + 0 \cdot 2,71 + 0,5 \cdot 13,0 \cdot 32,5 \cdot 0,665) = 6852,86 \text{ kN/m}$$

$$E_d = \gamma_G \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot b' + \gamma_Q \cdot q_k \cdot b' = 1,35 \cdot 4,5 \cdot 18,5 \cdot 32,5 + 1,5 \cdot 20 \cdot 32,5 \\ = 4627,59 \text{ kN/m}$$

$$4627,59 \text{ kN/m} \leq 6852,86 \text{ kN/m} \quad \text{warunek spełniony (wytężenie 67,5\%)}$$

Kombinacja 2:

$$\phi'_d = \text{atan} \left(\frac{\tan(\phi'_k)}{\gamma_\phi} \right) = \text{atan} \left(\frac{\tan(11^\circ)}{1,25} \right) = 8,84^\circ$$

$$c'_d = \frac{c'_k}{\gamma_c} = \frac{8}{1,25} = 6,40 \text{ kPa}$$

$$N_q = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{8,84^\circ}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan 8,84^\circ} = 2,222$$

$$N_c = \frac{(2,222 - 1)}{\tan 8,84^\circ} = 7,857$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (2,222 - 1) \cdot \tan 8,84^\circ = 0,380$$

$$R' = 32,5 \cdot (6,4 \cdot 7,857 + 0 \cdot 2,222 + 0,5 \cdot 13,0 \cdot 32,5 \cdot 0,380) = 4243,19 \text{ kN/m}$$

$$E_d = \gamma_G \cdot h_1 \cdot \gamma_{1,k} \cdot b' + \gamma_Q \cdot q_k \cdot b' = 1,0 \cdot 4,5 \cdot 18,5 \cdot 32,5 + 1,3 \cdot 20 \cdot 32,5 \\ = 3550,63 \text{ kN/m}$$

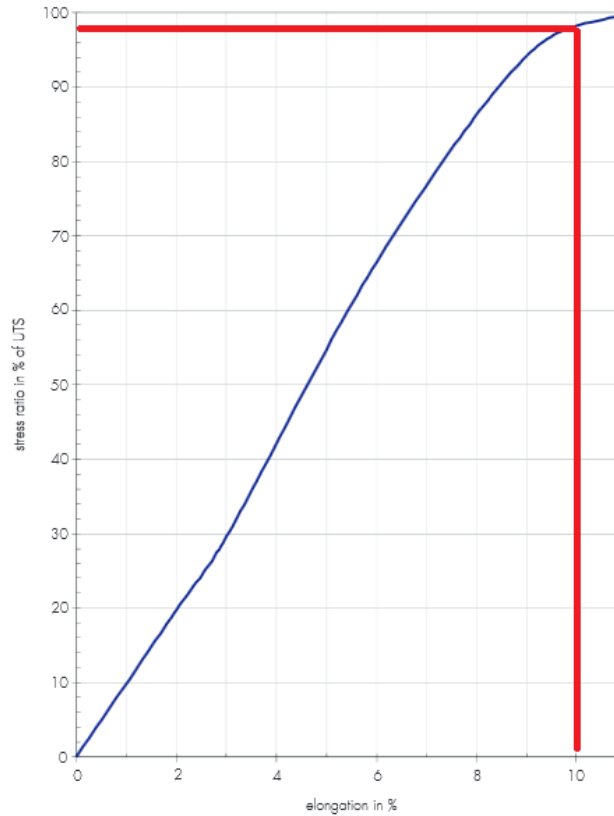
$$3550,63 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \leq 4243,19 \text{ kN/m} \quad \text{warunek spełniony (wytężenie 83,7\%)}$$

Dobór geosyntetyku

Maksymalna siła rozciągająca T_r :

$$T_r = \max \left\{ \begin{array}{l} T_{ro} \\ T_{ds} + T_{rf} \end{array} \right. = \max \left\{ \begin{array}{l} 20,1 \\ 110,66 + 94,4 \end{array} \right. = 205,06 \text{ kN/m}$$

Przyjęto geotkaninę poliestrową o charakterystycznej krótkoterminowej wytrzymałości na rozciąganie: $T_{char} = 600$ [kN], zależności naprężenie-odkształcenie przedstawionej na rysunku 3.32 i współczynnikach redukcyjnych zestawionych w tabeli 4.5.



Rysunek 4.14 Zależność naprężenie-odkształcenie dla wybranej geotkaniny.

Tabela 4.5 Współczynniki redukcyjne dla wybranej geotkaniny

Współczynnik ze względu na:		
pełzanie	RF_{CR}	1,52
uszkodzenia podczas wbudowania	RF_{ID}	1,1
starzenie się w warunkach atmosferycznych	RF_W	1,0
wpływ oddziaływań chemicznych/środowiskowych	RF_{CH}	1,14
ekstrapolację danych	f_s	1,17

Wytrzymałość na zerwanie w wyniku pełzania w określonym czasie i temperaturze:

$$T_B = T_{CR} = \frac{T_{char}}{RF_{CR}} = \frac{600}{1,52} = 394,7 \text{ [kN]}$$

Projektowa wytrzymałość dla stanu granicznego nośności:

$$T_D = \frac{T_{CR}}{f_m}$$

$$f_m = RF_{ID} \cdot RF_W \cdot RF_{CH} \cdot f_s$$

$$f_m = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,14 \cdot 1,17 = 1,467$$

$$T_D = \frac{T_{CR}}{f_m} = \frac{394,7}{1,467} = 269,0 [kN]$$

Projektowa wytrzymałość dla stanu granicznego użytkowości:

Ze względu na wymóg ograniczenia odkształceń (SLS), na podstawie krzywej naprężenie-odkształcenie wybranej geotkaniny (rys. 4.14), przyjęto redukcję charakterystycznej krótkoterminowej wytrzymałości zbrojenia do 98%; przyjmując dopuszczalne odkształcenia wyrobu równe 10%; $T_{CS} = 588 [kN]$

$$T_D = \frac{T_{CS}}{f_m} = \frac{588}{1,467} = 400,8 [kN]$$

Projektowa wartość wytrzymałości zbrojenia geosyntetycznego:

$$T_D = \min \begin{cases} T_{D,SGN} = 269,0 \text{ kN} \\ T_{D,SGU} = 400,8 \text{ kN} \end{cases} = 269,0 [kN]$$

$$\frac{T_D}{f_n} > T_r$$

$$\frac{269,0}{1,1} = 244,55 \text{ kN} > 205,06 \text{ kN}, \quad \text{warunek został spełniony (wytężenie 83,9\%)}$$

4.3. Uwagi do obliczeń wg BS 8006:2010

W normie BS 8006:2010 [2], w obliczeniach nasypu posadawianego na podłożu słabonośnym, nie stosowano ścisłego rozdziału na stan budowlany oraz eksploatacyjny. W analizie stateczności wykorzystuje się efektywne parametry wytrzymałościowe gruntu (c' , φ'), co oznacza, że obliczenia przeprowadzane są de facto dla warunku stateczności długotrwałej. Zaleca się jednak, aby w przypadku podłoża gruntowego o bardzo małej wytrzymałości wykonać również analizę stateczności krótkotrwałej.

W wytycznych brytyjskich położono duży nacisk na stan graniczny użytkowości. Zaleca się przeprowadzenie analiz z uwagi na możliwość wystąpienia nadmiernych odkształceń

(wydłużeń) zbrojenia oraz nadmiernych osiadań konstrukcji. Pierwszy warunek sprawdzany jest poprzez porównanie działających w geosyntetyku obciążeń z mobilizowaną wytrzymałością, określoną dla dopuszczalnego wydłużenia zbrojenia, co przy rygorystycznym ograniczeniu odkształceń konstrukcji może okazać się decydujące przy wymiarowaniu zbrojenia podstawy nasypu.

Problematycznym elementem przy wymiarowaniu konstrukcji wg BS 8006 jest określenie wartości współczynników współpracy związanych z wzajemnym oddziaływaniem grunt/zbrojenie. Współczynnik a' odnoszący się do $\tan\phi'_{cv}$ nie jest jednoznacznie określony w normie i należy przyjmować go w zależności od rodzaju zastosowanego geosyntetyku oraz kąta tarcia wewnętrznego zastosowanego gruntu. Jego wartość powinna być deklarowana na podstawie wyników z badań oporu na wyciąganie geosyntetyku z gruntu, tzw. „pull-out tests”, jednak niewielu producentów zamieszcza w specyfikacji swojego wyrobu informacje na ten temat, co powoduje, że w większości przypadków współczynnik ten przyjmowany jest bardzo zachowawczo. Podobnie sytuacja wygląda ze współczynnikiem współpracy a'_{bc} związanym z wzajemnym oddziaływaniem grunt/zbrojenie ze względu na c_u . Oba współczynniki wykorzystywane są przy określaniu niezbędnej, wymaganej nośności zbrojenia z uwagi na warunek stateczności na obrót, jak również wyparcie gruntu spod podstawy nasypu. Jednak największe znaczenie mają przy sprawdzeniu poślizgu skarpy po powierzchni zbrojenia, gdzie niewłaściwy dobór wartości współczynnika a' może spowodować nieprawidłowe określenie minimalnej długości zakotwienia zbrojenia w nasypie

Wyznaczenie siły związanej ze statecznością na obrót może być przeprowadzone metodą analityczną przedstawioną w normie BS 8006:2010, jak również za pomocą zmodyfikowanej metody Bishopa lub Janbu zaimplementowanej do odpowiedniego programu komputerowego. W normie nie podano jednoznacznie, czy obliczenia te powinny być wykonywane dla wartości charakterystycznych czy obliczeniowych. W kwestii obliczeń stateczności ogólnej nasypów na słabym podłożu zwrócono uwagę na konieczność stosowania odpowiednich współczynników częściowych.

Następnym elementem, który może budzić zastrzeżenia przy analizie wzmocnienia podstawy nasypu według zaleceń brytyjskich jest sposób przyjmowania wartości c_{uo} przy obliczaniu maksymalnej siły rozciągającej w zbrojeniu z uwagi na warunek wyparcia gruntu spod

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

podstawy nasypu. Wartość ta nazwana została w normie jako „wytrzymałość na ścinanie podłoża gruntowego w warunkach bez drenażu na spodniej stronie zbrojenia”, co w przypadku wykonania podsypki pod zbrojeniem może sugerować, że wartość ta ulega znacznej redukcji. Przyjęcie maksymalnej wartości wytrzymałości na ścinanie bez drenażu gruntu słabonośnego może doprowadzić do przeszacowania siły w zbrojeniu geosyntetycznym, natomiast pominięcie tego wpływu, może doprowadzić do awarii konstrukcji.

5.0 PORÓWNANIE ZALECEŃ PROJEKTOWYCH

Zastosowanie odpowiedniego zbrojenia geosyntetycznego w podstawie nasypu posadowionego na słabym podłożu gruntowym poprawia jego stateczność. Analizując szczegółowo zapisy normy BS 8006:2010 [2] i wytycznych EBGeo 2010 [14] stwierdzono, że rozpatruje się w nich nieco inne mechanizmy zniszczenia.

5.1. Porównanie wyników obliczeń

Zgodnie z zaleceniami EBGeo 2010 należy przeanalizować stateczność ogólną dla kołowych powierzchni poślizgu i łamanych powierzchni poślizgu, stateczność na poślizg i wyparcie, a także sprawdzić nośność podłoża gruntowego. W przypadku BS 8006 należy rozpatrzyć: stateczność lokalną skarp nasypu, stateczność na obrót, poślizg i wyparcie oraz stateczność globalną. Ponadto w BS 8006 rozpatruje się również stan graniczny użytkowalności ze względu na nadmierne wydłużenie zbrojenia oraz osiadania.

Podstawową różnicą w przypadku obliczeń prowadzonych zgodnie z zaleceniami niemieckimi jest fakt, że w EBGeo 2010 rozróżnia się dwa stany konstrukcji: stan budowlany, dla którego stosuje się parametry całkowite i stan eksploatacyjny, w obliczeniach którego uwzględnia się parametry efektywne słabego podłoża. W przypadku normy brytyjskiej obliczenia zasadniczo prowadzi się wykorzystując efektywne parametry wytrzymałościowe. Jedyna wzmianka o stateczności krótkoterminowej pojawia się w przypadku analiz stateczności bardzo słabego podłoża, gdy istnieje przypuszczenie, że wariant z warunkami bez drenażu może okazać się decydujący.

Analizując schematy zniszczenia można zauważyć, że tylko poślizg, wyparcie i stateczność ogólna są szczegółowo omówione i sprawdzane w przypadku obu zestawów wytycznych.

Obliczenia stateczności na poślizg zgodnie z EBGeo sprawdzane są dla wariantu poślizgu po górnej i dolnej powierzchni zbrojenia, natomiast według normy brytyjskiej BS 8006:2010 jedynie po górnej powierzchni zbrojenia. Istotną różnicą jest również fakt, że na podstawie zaleceń EBGeo 2010 można także określić wysokość zawinięcia zbrojenia poprawiająca

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

stateczność na poślizg konstrukcji. W normie BS 8006 nie uwzględniono takiego rozwiązania technologicznego. Pomimo różnic w analizie tego mechanizmu zniszczenia, siły rozciągające w geosyntetyku, uzyskane z obliczeń wg tych dwóch zestawów zaleceń dla danych zawartych w przykładzie obliczeniowym różnią się tylko o ok. 15% (tab. 3.18), przy czym siła parcia gruntu zasypowego wywołująca poślizg obliczona według zaleceń niemieckich w całości przejmowana jest przez siły tarcia na powierzchni geosyntetyku, bez konieczności uwzględnienia dodatkowych oporów na wyciąganie.

Kolejnym mechanizmem zniszczenia, rozpatrywanym zarówno przez zalecenia angielskie jak i niemieckie, jest stateczność na wyparcie. W obydwu przypadkach w przykładzie obliczeniowym przyjęto założenie wyparcia całej objętości słabego gruntu. W celach porównawczych w przypadku BS 8006:2010 i EBGeo 2010 założono stałą wartość wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu, podczas gdy istnieje możliwość przyjęcia w obliczeniach wg normy brytyjskiej liniowego rozkładu wytrzymałości na ścinanie, rosnącego wraz z głębokością, a w przypadku obliczeń wg zaleceń niemieckich można zastosować lokalną redukcję tego parametru na poziomie powierzchni wyparcia. Z obliczeń uzyskano wartości sił różniące się o ok. 30% (tab. 5.1), przy czym większą wartość otrzymano z analiz wyparcia wg EBGeo.

Tabela 5.1 Siły wymagane w zbrojeniu ze względu na warunki poślizgu i wyparcia

Siła związana ze statecznością na:	EBGeo 2010	BS 8006: 2010
poślizg	$E_{ah,d} = 93,42 \text{ kN/m}$	$T_{ds} = 110,66 \text{ kN/m}$
wyparcie	$R_{U,d} = 124,54 \text{ kN/m}$	$T_{rf} = 94,4 \text{ kN/m}$

Innym kryterium porównawczym jest współczynnik wykorzystania μ związany ze statecznością ogólną konstrukcji, do określenia którego wykorzystano program komputerowy GGU Stability. Nasyp wykazuje lepszą stateczność, zarówno w warunkach bez drenażu (tzw. stateczność początkowa), jak i z drenażem (stateczność końcowa - stan eksploatacyjny) (patrz tab. 5.2) dla przykładu obliczeniowego według zaleceń angielskich. Wymagana siła w zbrojeniu niezbędna do zapewnienia stateczności początkowej, jest blisko pięciokrotnie mniejsza w przypadku obliczeń na podstawie normy BS 8006 niż wynikająca

z analiz według EBGeo. W przypadku obliczeń w stanie eksploatacyjnym, według obu zaleceń (BS i EBGeo) zbrojenie podstawy nasypu nie jest potrzebne.

Tabela 5.2 Stateczność ogólna

Stateczność:		EBGeo 2010	BS 8006:2010
początkowa	bez zbrojenia	$\mu = 1,22$	$\mu = 1,04$
	ze zbrojeniem (dla $\mu = 1,0$)	$R_d = 79,9 \text{ kN/m}$	$R_d = 20,1 \text{ kN/m}$
końcowa		$\mu = 0,70$	$\mu = 0,62$

Duże różnice występują w wynikach obliczeń nośności podłoża (patrz tab. 5.3), które niestety zarówno w normie BS8006, jak i wytycznych EBGeo, nie są odpowiednio omówione. Różnice te wynikają głównie z wartości współczynników częściowych, przyjmowanych do obliczeń. Zarówno współczynniki obciążenia, oporu gruntu jak i materiałowe, są zróżnicowane. Wynika to w dużej mierze z przyjętych przez Wielką Brytanię i Niemcy, w załączniku krajowym do EC7, odmiennych podejść obliczeniowych, co znacząco wpłynęło na wyniki sprawdzanych warunków stateczności.

Tabela 5.3 Nośność podłoża gruntowego

Stan:	EBGeo 2010	BS 8006:2010	
		Komb. 1	Komb. 2
początkowy	$h_{max} = 1,9 \text{ m}$	$h_{max} = 1,9 \text{ m}$	$h_{max} = 1,6 \text{ m}$
końcowy	$\mu = 0,93$	$\mu = 0,68$	$\mu = 0,84$

Analizując wpływ poszczególnych mechanizmów zniszczenia na wartość wymaganej siły w zbrojeniu, można stwierdzić, że dużą rolę odgrywa warunek na wyparcie gruntu spod nasypu. Jednak, dla przyjętych w przykładzie obliczeniowym warunków, w przypadku zaleceń niemieckich decydującym warunkiem okazała się stateczność ogólna wzdłuż łamanej powierzchni poślizgu. Przyjęto konserwatywne założenie poślizgu po warstwie gruntu niespoistego, znajdującego się bezpośrednio pod gruntem słabonośnym. Należy pamiętać, że w praktyce projektowej jest to dodatkowe sprawdzenie stateczności globalnej (przy użyciu

Zbrojenie geosyntetyczne podstawy nasypu

złożonych mechanizmów zniszczenia), istotne w przypadku strukturalnie i/lub geologicznie zdefiniowanej powierzchni poślizgu.

Drugą co do wartości, maksymalną wymaganą siłą w zbrojeniu, w przypadku analiz według zaleceń niemieckich, była siła wynikająca z warunku na wyparcie (tab. 5.1). W przypadku normy brytyjskiej zazwyczaj decydującym warunkiem okazuje się suma sił związanych z wyparciem i poślizgiem (tab. 5.4).

Tabela 5.4 Maksymalne wymagane siły w zbrojeniu

EBGEO 2010	BS 8006:2010
$H = 219,03 \text{ kN/m}$	$T_{ds} + T_{rf} = 205,06 \text{ kN/m}$

Wymagane siły w zbrojeniu przekładają się na dobór zbrojenia i przyjmowaną wytrzymałość geosyntetyku na rozciąganie. W tym względzie zalecenia angielskie i niemieckie też się różnią. Według BS 8006 projektowa wartość wytrzymałości może wynikać z warunków stanu granicznego nośności lub stanu granicznego użyteczności; w zaleceniach EBGEO nie uwypuklono tego drugiego aspektu.

Porównując wytyczne pod względem sposobu określenia wymaganej wytrzymałości długoterminowej, należy również zwrócić uwagę na częściowe współczynniki redukcyjne. Trzy z nich, tj. współczynniki uwzględniające: pełzanie, uszkodzenia podczas wbudowywania oraz oddziaływania chemiczne/środowiskowe, występują w obu wytycznych. W obliczeniach według zaleceń niemieckich obecny jest jeszcze współczynnik uwzględniający wpływ szwów i połączeń (którego wartość można przyjmować 1,0, jeżeli nie łączy się wyrobów na kierunku roboczym) i częściowy współczynnik bezpieczeństwa materiałowego dla konstrukcji z gruntu zbrojonego elementami odkształcalnymi (wartość 1,4, 1,3 lub 1,2 w zależności od sytuacji projektowej tj. stan trwały, tymczasowy czy wyjątkowy). W najnowszym wydaniu EBGEO dodatkowo wprowadzono współczynnik A_5 uwzględniający oddziaływania dynamiczne. W zaleceniach angielskich występują dodatkowo współczynniki uwzględniające: starzenie się wyrobu w warunkach atmosferycznych, ekstrapolację danych oraz częściowy współczynnik bezpieczeństwa związany z ekonomicznymi konsekwencjami wystąpienia zniszczenia (wartość 1,1 lub 1,0 w zależności od kategorii konstrukcji).

5.2. Stateczność lokalna

Wymóg analizy stateczności lokalnej sprecyzowany jest jednoznacznie tylko w zaleceniach angielskich. Należy sprawdzić czy nachylenie skarpy jest mniejsze od wartości tangensa kąta tarcia wewnętrznego grunty nasypowego. Warunek jest bardzo prosty, a jego niespełnienie może mieć negatywny wpływ zarówno na estetykę i jak i eksploatację wykonanej konstrukcji.

W wytycznych niemieckich warunek ten nie jest wyraźnie określony. Jedynie, w paragrafie dotyczącym analizy globalnego zniszczenia, zapisano, że ważne jest aby sprawdzić stateczność wzdłuż różnie zlokalizowanych krytycznych powierzchni poślizgu, również wzdłuż tych wewnątrz nasypu i nie przecinających warstw zbrojenia.

5.3. Stateczność na obrót (ogólna)

W wytycznych angielskich BS 8006:2010 zaleca się przeanalizowanie stateczności na obrót oraz stateczności ogólnej. Różnica polega na lokalizacji kołowej powierzchni poślizgu, po której dochodzi do utraty stateczności. W pierwszym przypadku (obrot) powierzchnia przechodzi przez konstrukcję nasypu oraz podłoże gruntowe. W warunku stateczności ogólnej zakłada się, że konstrukcja nasypu zachowuje się jak monolit, który w całości ześlizguje się po powierzchni poślizgu przechodzącej tylko w podłożu gruntowym. Wydaje się, że taki rozdział stateczności jest zbędny i należy rozpatrywać wszystkie możliwe do zaistnienia powierzchnie poślizgu w ramach sprawdzenia warunków stateczności ogólnej, tak jak jest to praktykowane w zaleceniach niemieckich.

Dodatkowo w wytycznych EBGEO podano analityczny sposób sprawdzenia stateczności globalnej przy użyciu złożonych mechanizmów zniszczenia – poślizg wzdłuż powierzchni łamanej, w przypadku strukturalnie i/lub geologicznie zdefiniowanej powierzchni poślizgu. Niewątpliwie jest to zaletą tych zaleceń, ponieważ taka analiza umożliwia ogólny rozpatrywanej sytuacji oraz wstępne oszacowanie długości zakotwienia zbrojenia w strefie aktywnej.

5.4. Stateczność na poślizg

Najważniejszą różnicą w analizie stateczności konstrukcji nasypu posadowionego na słabym podłożu gruntowym jest w normie angielskiej, brak konieczności sprawdzenia możliwości wystąpienia poślizgu na dolnej powierzchni zbrojenia. Wydaje się to całkowicie uzasadnione, ponieważ aby mogło dojść do tego typu zniszczenia, zbrojenie musiałoby ulec rozerwaniu. Jednakże w przypadku gdy zbrojenie spełnia warunki stateczności ogólnej, zerwanie nie może wystąpić. Dlatego też przeprowadzanie analizy poślizgu na dolnej powierzchni zbrojenia uważa się za zbędne.

W przypadku poślizgu na górnej powierzchni zbrojenia również zauważalne są pewne różnice między wytycznymi. Dotyczą one sposobu określania sił utrzymujących. Według normy angielskiej siła w zbrojeniu jest równa co do wartości sile wynikającej z parcia czynnego od gruntu nasypowego oraz obciążenia użytkowego, na bazie którego określa się potrzebną długość zakotwienia zbrojenia, niezbędną do wygenerowania tarcia, które przeniesie siły od parcia na zbrojenie.

W zaleceniach niemieckich oddziaływaniem utrzymującym jest suma siły tarcia na powierzchni zbrojenia oraz siły dodatkowej od zbrojenia (wytrzymałości na rozciąganie zbrojenia lub opór na wyciąganie zbrojenia, decyduje mniejsza wartość). Jednak jeżeli siła tarcia jest większa od oddziaływania destabilizującego (parcia czynnego) siły dodatkowe są pomijane przy doborze geosyntetyku jako zbrojenia. Nasuwa się pytanie, jaka jest w rzeczywistości wartość siły rozciągającej w zbrojeniu? Jeżeli siła $R_{o,d}$ (siła tarcia na powierzchni zbrojenia) jest większa bądź równa parciu czynnemu, to generowana siła rozciągająca w geosyntetyku ma wartość równą parciu czynnemu, tak jak ma to miejsce w BS 8006:2010. Ta siła powinna być uwzględniona w doborze geosyntetyku.

5.5. Wyparcie bryły gruntu w podstawie

W analizie wyparcie (wyciśnięcia) bryły gruntu słabego podłoża spod podstawy nasypu zauważa się pewną niejasność dotyczącą określania siły w zbrojeniu. Związane jest to z warunkiem równowagi sił działających na bryłę wypieranego gruntu oraz poprawnym określeniem siły $R_{U,d}$ (EBGEO) jak i T_{rf} (BS 8006) z bilansu tych sił.

Biorąc pod uwagę różnice pomiędzy zaleceniami niemieckimi a angielskimi, w obliczeniach stateczności konstrukcji na wyparcie, to główna dotyczy branej pod uwagę miąższości słabego podłoża gruntowego. W wytycznych EBGeo nie podano szczególnych ograniczeń dotyczących miąższości. Jedyną dodatkową informacją dotyczy przewarstwień o niższej wytrzymałości na ścinanie, które określono w badaniach polowych. Natomiast w przypadku braku informacji dodatkowych, tak jak w przypadku podłoża jednorodnego, miąższość słabej strefy w gruncie należy przyjmować do spągu warstwy słabej zalegającej w podłożu gruntowym.

W standardach brytyjskich maksymalna miąższość warstwy słabej, w przypadku gdy wytrzymałości na ścinanie nie zmienia się wraz z głębokością, jest równa podwójnej wysokości nasypu. W obliczeniach istnieje możliwość uwzględnienia liniowego wzrostu wytrzymałości na ścinanie wraz z głębokością.

5.6. Nośność podłoża

W przypadku zaleceń EBGeo nośność podłoża powinna być obliczana wg normy DIN 4017 [5], z uwzględnieniem zapisów normy DIN 1054 [4]. Nasyp jest traktowany jako kwazi-monolit a sprawdzenie nośności należy przeprowadzać w szczególności kiedy grunt o małej wytrzymałości ma małą miąższość. Na ogół warunkiem krytycznym jest globalne zniszczenie a nie nośność podłoża.

W wytycznych BS 8006 nie ma żadnej informacji na temat analizy nośności podłoża gruntowego, dlatego też należy skorzystać z innych brytyjskich normatywów (m.in. BS 8004 [1] oraz oczywiście zapisów zawartych w EC7 [22]).

5.7. Dobór zbrojenia

Przy projektowaniu konstrukcji zbrojonych kluczowym elementem jest sposób doboru zbrojenia i przyjmowane wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa materiałowego. Bardziej restrykcyjne warunki odnośnie doboru zbrojenia narzuca BS 8006. Według normy brytyjskiej na wybór zbrojenia mają wpływ również warunki stanu granicznego użytkowalności; uwzględniać należy dopuszczalne odkształcenie zbrojenia, które w szczególnych przypadkach może być decydujące. Oprócz tego w zaleceniach brytyjskich

powołano częściowy współczynnik bezpieczeństwa związany z ekonomicznymi konsekwencjami wystąpienia zniszczenia (który koresponduje z kategoriami geotechnicznymi wyróżnionymi w Eurokodzie 7 [22], w ogóle nie uwzględniony w wytycznych niemieckich.

Kolejną różnicą przy doborze zbrojenia jest sposób określenia maksymalnej siły rozciągającej w zbrojeniu. Według EBGEO 2010 przyjmowana jest maksymalna siła spośród wszystkich rozpatrywanych mechanizmów zniszczenia, a w przypadku BS 8006:2010 wybiera się większą wartość z: siły uzyskanej z warunku stateczności na obrót lub sumy sił z warunków stateczności na poślizg i wyparcie.

Bardzo ważnym czynnikiem decydującym o zapewnieniu warunków stateczności jest przyczepność zbrojenia, przy określeniu której pojawiają się kolejne różnice w zaleceniach. Wytyczne niemieckie zalecają przyjmowanie współczynnika tarcia o wartości $0,5 \times \tan(\varphi')$, natomiast angielskie $a' \times \tan(\varphi'_{cv})$, gdzie wartość a' nie została dokładnie sprecyzowana, wiadomo jednak, że należy przyjąć wartość mniejszą bądź równą jedności. W tym przypadku standardy angielskie pozostawiają dowolność wyboru wartości projektantowi, który w zależności od rodzaju wyrobu i dostępnych danych może przyjąć odpowiednią wartość współczynnika.

Sprawdzając ostatecznie dobór zbrojenia według zaleceń niemieckich należy sprawdzić opór na wyciąganie zbrojenia, natomiast w przypadku wytycznych angielskich trzeba obliczyć minimalną wymaganą długość zakotwienia.

5.8. Użytkowość

W wytycznych brytyjskich położono duży nacisk na stan graniczny użytkowości. Zaleca się przeprowadzenie analiz z uwagi na możliwość wystąpienia nadmiernych odkształceń (wydłużeń) zbrojenia oraz nadmiernych osiadań konstrukcji. Pierwszy warunek sprawdzany jest poprzez porównanie działających w geosyntetyku obciążeń z mobilizowaną wytrzymałością określoną dla dopuszczalnego wydłużenia zbrojenia, co przy rygorystycznym ograniczeniu odkształceń konstrukcji może okazać się decydujące przy wymiarowaniu zbrojenia podstawy nasypu.

Zasadniczo jako podstawowe kryterium dopuszczalnego odkształcenia zbrojenia przyjmuje się, że maksymalne odkształcenie w zbrojeniu podstawy ε_{\max} nie powinno przekraczać 5 % dla zastosowania krótkoterminowego oraz od 5 do 10 % dla zastosowań długoterminowych. Natomiast w zaleceniach niemieckich nie położono nacisku na potrzebę dokonania analizy stanu granicznego użyteczności zbrojenia geosyntetycznego w podstawie nasypu.

6.0 PODSUMOWANIE

Obowiązek projektowania posadowień zgodnie z Eurokodem 7 [22] wynika z Rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych z dnia 25 kwietnia 2012 r. D. U. Warszawa, dnia 27 kwietnia 2012 r. Poz. 463. W sytuacji polskich projektantów nie dysponujących szczegółowymi krajowymi normatywami wymiarowania wyrobów geosyntetycznych w budowlach ziemnych, analizy obliczeniowe i proces projektowania wymagają odpowiedniej znajomości skutków projektowania zgodnie zaleceniami dostępnymi w przypisach krajów unijnych, zgodnymi z założeniami Eurokodu 7. Warunki takie spełniają najczęściej wykorzystywane obecnie w Polsce wytyczne EBGEO 2010 [14] Niemieckiego Komitetu Geotechniki stworzone w oparciu o aktualne normy DIN, jak również brytyjska norma BS 8006:2010 [2]. Taki stan powoduje szereg sporów i napięć w procedurach przetargowych i analizach projektowych z uwagi na rozbieżności w tych zaleceniach, przekładające się ostatecznie na przyjmowane rozwiązania projektowe i kryteria odbiorowe obiektów. Podkreślenia wymaga konieczność konsekwentnego stosowania jednego z wybranych systemów obliczeń, gdyż mieszanie kryteriów prowadzić może do rozwiązań niewłaściwych lub wręcz niebezpiecznych. Stosowanie wybiórczo konkretnych schematów lub sposobów obliczeń wymaga szczegółowego uzasadnienia celu takiej analizy.

W ramach prowadzonych prac studialnych wykonano obliczenia zbrojenia geosyntetycznego podstawy nasypu posadowionego na podłożu słabonośnym według obu zaleceń dla kilkuset przypadków obliczeniowych. Stwierdzono że każde z wytycznych mają swoje wady i zalety. Opracowując polski załączniki normowy dotyczący gruntu zbrojonego geosyntetykami, należałoby wybrać najbardziej odpowiednie elementy analiz z obu wytycznych celem stworzenia spójnych wytycznych, umożliwiających bezpieczne i ekonomiczne projektowanie wzmocnień geosyntetycznych podstawy nasypów na słabonośnym podłożu gruntowym w warunkach polskich.

Bardziej przejrzyste i proste w użyciu są zalecenia zawarte w wytycznych EBGeo, które z założenia miały stanowić poradnik dla projektanta, mają wyraźne odniesienia do obowiązującej w Europie normy EC 7 [22], a ponadto opatrzone zostały przykładami analiz zrobionych krok po kroku. Warto podkreślić, że podejścia projektowe według tych właśnie wytycznych zgodne są z EC 7 i ich adaptacja do polskich warunków jest prostsza ze względu na to, że według polskiej normy przyjęte do stosowania dla stateczności jest podejście obliczeniowe nr 3.

Warto pamiętać, że uzyskanie wiarygodnych rezultatów uzależnione jest od wielu różnorodnych czynników: od właściwego określenia parametrów gruntowych, co w przypadku gruntów słabonośnych jest szczególnie istotne, po prawidłowe określenie charakterystyki wyrobów geosyntetycznych, a szczególnie parametrów związanych z ich pracą w środowisku gruntowym.

Zarówno zalecenia niemieckie jak i norma brytyjska podkreślają dodatkowo, że projektowanie nasypów na bardzo słabym podłożu powinno być poparte prawidłowo przeprowadzoną analizą metodami komputerowymi, np. MES lub MEB.

Wskazówki projektowe zawarte w wytycznych niemieckich i normie brytyjskiej, stanowią bardzo pomocne narzędzie do projektowania budowli ziemnych. Prostota wykonywania obliczeń wpływająca na rozpowszechnienie zaleceń w całej Europie, a co za tym idzie również w Polsce, może przyczynić się do szybszego wprowadzenia na polski rynek nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystujących geosyntetyki w budowie infrastruktury drogowej i kolejowej.

7.0 BIBLIOGRAFIA

- [1]. BS 8004:2015 Code of practice for foundations.
- [2]. BS 8006-1:2010 BSI British Standards, Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
- [3]. Bolt A. F., Duszyńska A.: „Kryteria doboru geosyntetyków jako warstwy filtracyjne i separacyjne” - Inżynieria Morska i Geotechnika 1/1998;
- [4]. DIN 1054 Subsoil - Verification of the safety of earthworks and foundations
- [5]. DIN 4017 Soil - Calculation of design bearing capacity of soil beneath shallow foundations.
- [6]. DIN 4084 Soil - Calculation of embankment failure and overall stability of retaining structures.
- [7]. Duszyńska A., Bolt A. F. (2010): Współpraca georusztu i gruntu w badaniu na wyciąganie. Monografia, Gdańsk 2004.
- [8]. Duszyńska A. (2010): Co warto wiedzieć o geosyntetykach. Inżynieria Morska i Geotechnika 2/2010.
- [9]. Duszyńska A., Szypulski P. (2012): Wymiarowanie wzmocnienia geosyntetycznego podstawy nasypu na słabym podłożu. Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2012.
- [10]. Duszyńska A., Makasewicz-Dzieciniak M. (2013): Nasyp z geosyntetycznym wzmocnieniem podstawy posadowiony na pionowych elementach nośnych. Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2013.
- [11]. Duszyńska A, Szypulski P. (2014): Projektowanie nasypów komunikacyjnych ze zbrojeniem geosyntetycznym podstawy na słabym podłożu gruntowym. Przegląd Komunikacyjny 5/2014 .
- [12]. Duszyńska A., Sikora Z. (2014): Dobór wyrobów geosyntetycznych do zbrojenia gruntu. Inżynieria Morska i Geotechnika 5/2014.
- [13]. Duszyńska A. (2014): Stateczność nasypów drogowych ze wzmocnieniem geosyntetycznym. Inżynieria i Budownictwo 5/2014.
- [14]. EBGEO: Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements Ernst W. & Sohn Verlag. 2011.

- [15]. Eekelen van S.J.M. (2015): Basal Reinforced Piled Embankments. TU Delft, Netherlands.
- [16]. Holtz R., Christopher B., Berg R.: „Geosynthetic Engineering“, BiTech Publish Ltd, Canada, 1997.
- [17]. Jewell R.A. (1996): Soil reinforcement with geotextiles, SP 123, CIRIA.
- [18]. ISO/TR 20432:2007 Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement.
- [19]. Kawalec J. (2010): Stabilizacja podłoża z wykorzystaniem georusztów IMiG nr4/2010.
- [20]. Koerner R.: Design with Geosynthetics, Prentice Hall, USA, 1994.
- [21]. NA to BS EN 1997-1:2004 UK National Annex to Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules.
- [22]. PN-EN 1997-1 Projektowanie geotechniczne. Zasady ogólne.
- [23]. PN-EN ISO 10318:2008 Geosyntetyki – Terminy i definicje
- [24]. PN-EN 13249:2014 Geotekstyli i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych do budowy dróg i innych powierzchni obciążonych ruchem (z wyłączeniem dróg kolejowych i nawierzchni asfaltowych)
- [25]. Wesołowski A., Krzywosz Z., Brandyk T. (2000): Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2000.
- [26]. Wysokoński L., Kotlicki W. (2007): Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojnego geosyntetykami. Wydawnictwo ITB. Instrukcja 429/2007.