

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW

ZAKŁAD GEOTECHNIKI
Ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa
Tel. 81 129 61 67 54 37 5 Fax 81 11 79 2



Zlecniodawca:
Generalna Dyrekcja
Dróg Krajowych i Autostrad

Temat TN/TG-221 Etap 2003

Metody stosowania geosyntetyków do budowy i wzmocnienia
nawierzchni i ziemnych budowli drogowych

Zadanie B

ZASTOSOWANIE GEOSYNTETYKÓW W BUDOWLACH ZIEMNYCH STUDIUM POZNAWCZO-TECHNICZNE

Zespół autorski:

mgr inż. **Beata Gajewska**
dr inż. **Bolesław Kłosiński**
mgr inż. **Piotr Rychlewski**
mgr inż. **Krzysztof Grzegorzewicz**

Kierownik Zakładu Geotechniki:

mgr inż. **Cezary Kraszewski**

Warszawa 2003

Spis treści

1. Przedmiot opracowania, zakres stosowania	4
2. Ogólna charakterystyka wyrobów geosyntetycznych	4
2.1. Surowce do wyrobów geosyntetycznych.....	4
2.2. Rodzaje i charakterystyka wyrobów geosyntetycznych	7
3. Funkcje geosyntetyków w budowlach ziemnych.....	11
4. Właściwości geosyntetyków	14
4.1. Cechy geometryczne i właściwości identyfikacyjne	17
4.2. Właściwości fizyczno-mechaniczne.....	18
4.3. Właściwości hydrauliczne	19
4.4. Odporność na uszkodzenia mechaniczne podczas wbudowania.....	24
4.5. Tarcie po gruncie (przyczepność).....	25
4.6. Trwałość geotekstyliów	25
4.7. Wytrzymałość obliczeniowa (długoterminowa) geotekstyliów.....	30
5. Wybór wyrobów geosyntetycznych	32
6. Zastosowania geosyntetyków do wzmacniania podłoża nawierzchni	35
6.1. Warstwy rozdzielające	35
6.2. Nawierzchnie nieulepszone	38
7. Zastosowania geosyntetyków do wzmacniania słabego podłoża nasypów.....	38
7.1. Wprowadzenie.....	38
7.2. Dobór materiałów geotekstylnych.....	40
7.3. Konstrukcja nasypów ze zbrojeniem z geosyntetyków	41
7.3.2. Podstawy projektowania zbrojenia nasypów.....	42
7.4. Analiza nasypów zbrojonych metodą elementów skończonych	48
8. Zastosowania geosyntetyków do drenaży i warstw filtracyjnych	49
8.1. Odwodnienia	49
8.2. Materiały geotekstylne używane w systemach drenażowych jako filtry	51
8.3. Mechanizm działania filtru geotekstylnego.....	52
8.4. Funkcje filtrów geotekstylnych	53
8.5. Wymagania hydrauliczne dla filtrów geotekstylnych.....	53
8.6. Wymagania dotyczące doboru filtrów	54
8.7. Drenaż francuski	55
9. Wbudowanie geosyntetyków w budowlę ziemne	59
9.1. Transport i składowanie	59
9.2. Przygotowanie podłoża.....	59
9.3. Układanie i zasypywanie geosyntetyków	59
10. Badania kontrolne i kryteria odbioru	61
11. Piśmiennictwo.....	62
a. Normy polskie.....	62
b. Normy zagraniczne	64
c. Przepisy prawne	65

d. Instrukcje i wytyczne Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych:.....	66
e. Publikacje	66
Załącznik 1. Klasy wytrzymałości geotekstyliów GRK.....	71
Załącznik 2. Projektowanie nawierzchni wzmocnionych geotekstyliami.....	74
Załącznik 3. Obliczanie stateczności nasypu na słabym podłożu wzmocnionym geosyntetykami	82
Załącznik 4. Projektowanie drenaży z użyciem geosyntetyków	88

1. Przedmiot opracowania, zakres stosowania

Przedmiotem pracy są wyroby geosyntetyczne oraz zasady ich stosowania w drogowych budowlach ziemnych. Zawarto w niej charakterystykę geosyntetyków w zależności od surowców, rodzajów wyrobu. Podano wskazówki dotyczące wyboru wyrobów geosyntetycznych w zależności od przeznaczenia i rodzaju zastosowań. Wskazano źródła podające zasady projektowania i konstruowania budowli z zastosowaniem materiałów geosyntetycznych.

Opracowanie zawiera zasady i wymagania dotyczące projektowania:

- warstw separacyjnych z geosyntetyków,
- wzmacniania nawierzchni nieulepszonych i podłoża ulepszonych nawierzchni podatnych,
- zbrojenia podstaw nasypów na słabym podłożu,
- drenaży i warstw filtracyjnych.

Praca jest przeznaczona do użytku administracji drogowej, jednostek projektujących i wykonujących budowle drogowe, a także producentów wyrobów geosyntetycznych.

2. Ogólna charakterystyka wyrobów geosyntetycznych

2.1. Surowce do wyrobów geosyntetycznych

Głównymi surowcami do wyrobu geotekstyliów są:

- polipropylen PP,
- poliester PES, PET,
- polietylen wysokiej gęstości PEHD,

w mniejszym zakresie polichlorek winylu PCV, poliamidy PA i inne, a także specjalne tworzywa o dużej sztywności na rozciąganie, małym pełzaniu i dobrej odporności chemicznej, jak poliwinylowoalkohol PVA i aramid.

Jako powłoki osłaniające stosuje się polichlorek winylu PVC, polietylen PE, żywice akrylowe i bitumy.

Do wyrobu geotekstyliów degradablealnych (biomat lub biowłóknin) używane są materiały roślinne: len, bawełna, juta, włókno kokosowe i inne.

Typowe właściwości polimerów stosowanych do produkcji geosyntetyków zestawiono w tablicy (tablica 1).

**Tablica 1. Właściwości polimerów stosowanych do produkcji geosyntetyków
[15, 18, 75, 82]**

Właściwości polimeru	Poliamid PA	Polietylen małej gęstości LDPE	Polietylen wysokiej gęstości HDPE	Polipropylen PP	Poliester PET	Polichlorek winylu PVC
Gęstość [kg/m ³]	1450	910-940	950-980	910	1380	1400
Moduł Younga [GPa]	1,4-2,0	0,15-0,24	0,55-1,0	1,2-1,7	2,8-3,1	2,4-3,0
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	70-85	7-17	20-37	50-70	60-80	40-60
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	200-300	200-550	> 20	200-700	> 50	2-40
Temperatura zeszklenia T _g [°C]	340	- 100	- 100	- 15 do 10	75	-
Temperatura mięknięcia T _m [°C]	550	110-120	125-135	160-167	250-260	-

Temperatura mięknięcia polimerów odpowiada temperaturze utraty sztywności danego polimeru. Jej wartość liczbową nie jest jednoznaczna, gdyż w znacznym stopniu zależy od metody badania i domieszek.

Dane przedstawione w tablicy (tablica 1) zawierają typowe wartości, które mogą być odmienne od właściwości danego polimeru. Zróżnicowanie procesów polimeryzacji jest przyczyną zmiany liczby i długości rozgałęzień makrocząstek oraz stopnia krystalizacji produktu finalnego. Właściwości polimeru mogą być również zmieniane przez obróbkę mechaniczną, która powoduje orientację makrocząsteczek. Wpływ na właściwości polimerów mają też różne dodatki. Z tych powodów ten sam polimer wyprodukowany w jednej fabryce może znacznie różnić się od polimeru wyprodukowanego w drugiej fabryce.

Właściwości chemiczne polimerów zestawiono w tablicy (tablica 2).

Polimery przy produkcji geosyntetyków są modyfikowane. Właściwości mechaniczne gotowych wyrobów geotekstylnych mogą być odmienne od podanych w tablicy (tablica 1).

Tablica 2. Odporność chemiczna tworzyw sztucznych [18, 82]

Odporność na (przy długotrwałym stosowaniu w temp. 20°C):	Poliamid PA	Polietylen małej gęstości LDPE	Polietylen wysokiej gęstości HDPE	Polipropylen PP	Poliester PET	Polichlorek winylu PVC
Kwasy						
słabe	-	+	+	+	-	+
mocne	-	+	+	+	-	+
utleniające	-	-	-	-	S	+
fluorowodorowe	-	+	+	S	-	+
Zasady						
słabe	+	+	+	+	-	+
mocne	S	+	+	+	-	+
Rozpuszczalniki						
alkohole	+	S	+	+	+	-
estry	+	S	+	+	S	-
ketony	+	S	+	+	S	-
etery	+	-	S	S	-	-
Materiały pędne i oleje						
benzen	+	-	S	S	S	-
benzyna	+	S	+	+	+	+
oleje mineralne	+	S	+	+	+	+
oleje tłuszczowe	+	S	+	+	+	+
+ – odporny s – średnio odporny - – nieodporny						

Tablica 3. Temperatura użytkowania tworzyw sztucznych [75, 88]

Polimer	Temperatura użytkowania		
	maksymalna krótkotrwała	maksymalna ciągła	minimalna ciągła
Polietylen małej gęstości LDPE	80/90	60/75	-50
Polietylen wysokiej gęstości HDPE	90/120	70/80	-50
Polipropylen PP	140	100	0/-30
Polichlorek winylu PVC	55/100	50/85 (70)	0/-20
Poliamid PA	170/200	80/120 (100)	-30
Poliester PET	200	100	-20

W tablicy (tablica 3) zestawiono zakresy temperatur, w jakich mogą pracować poszczególne polimery.

Przykładowe substancje mogące wywołać powstawanie mikropęknięć naprężeniowych zestawiono w tablicy (tablica 4).

Tablica 4. Substancje chemiczne wywołujące tworzenie się mikropęknięć naprężeniowych [75]

Substancja chemiczna	Tworzywo sztuczne			
	Poliamid PA	Polietylen PE	Polipropylen PP	Polichlorek winylu PVC
Aceton	+			
Alkohole		+		
Anilina		+	+	
Benzyna	+	+		
Ropa naftowa		+		
Kwas octowy		+	+	
Estry		+		
Olej opałowy		+		
Ketony		+		
Metanol				+
Kwas azotowy		+	+	
Kwas krzemowy		+		
Kwas siarkowy			+	
Woda		+		

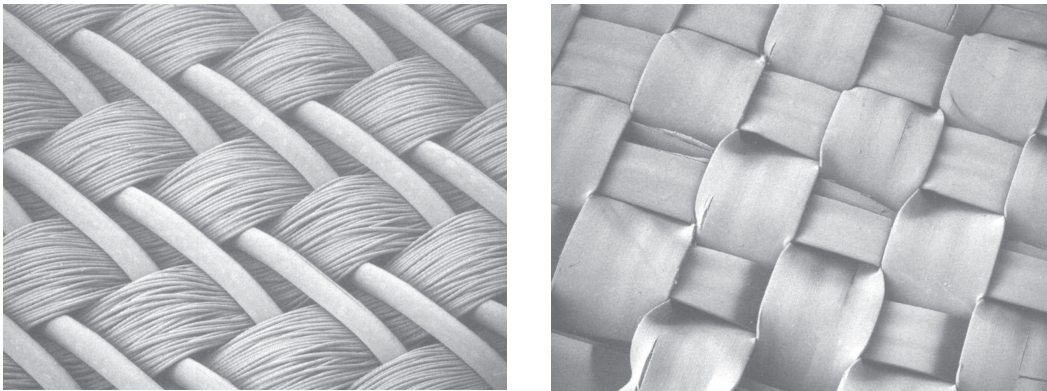
2.2. Rodzaje i charakterystyka wyrobów geosyntetycznych

Główną grupą wyrobów geosyntetycznych stosowanych w budownictwie są geotekstylia i wyroby pokrewne. Norma PN-ISO 10318:1993 definiuje wyrób geotekstylny jako przepuszczalny materiał polimerowy wytwarzany techniką tkacką, włókninową lub dziewiarską. Obecnie stosowane są także wyroby geosyntetyczne wykonywane innymi technikami niż tkacka. Należy zwrócić uwagę na spotykane błędne określanie wszystkich geotekstyliów terminem "geowłókniny".

Geosyntetyki - geokraty, geowłókniny, geotkaniny, geokompozyty, geosiatki

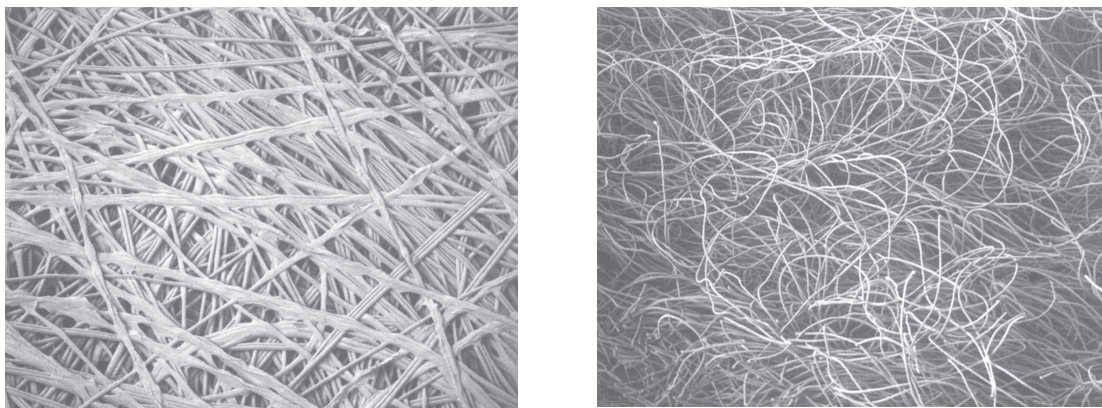
Wyróżnia się następujące rodzaje wyrobów geosyntetycznych:

- **geotekstylia** - grupa wyrobów obejmująca geotkaniny, geowłókniny, geosiatki tkane i geodzianiny,
- **geotkaniny** - wytwarzane przez przeplatanie dwóch lub więcej układów przędz, włókien, filamentów, taśm lub innych elementów (rys. 1),



Rys. 1. Przykłady geotkanin [43]

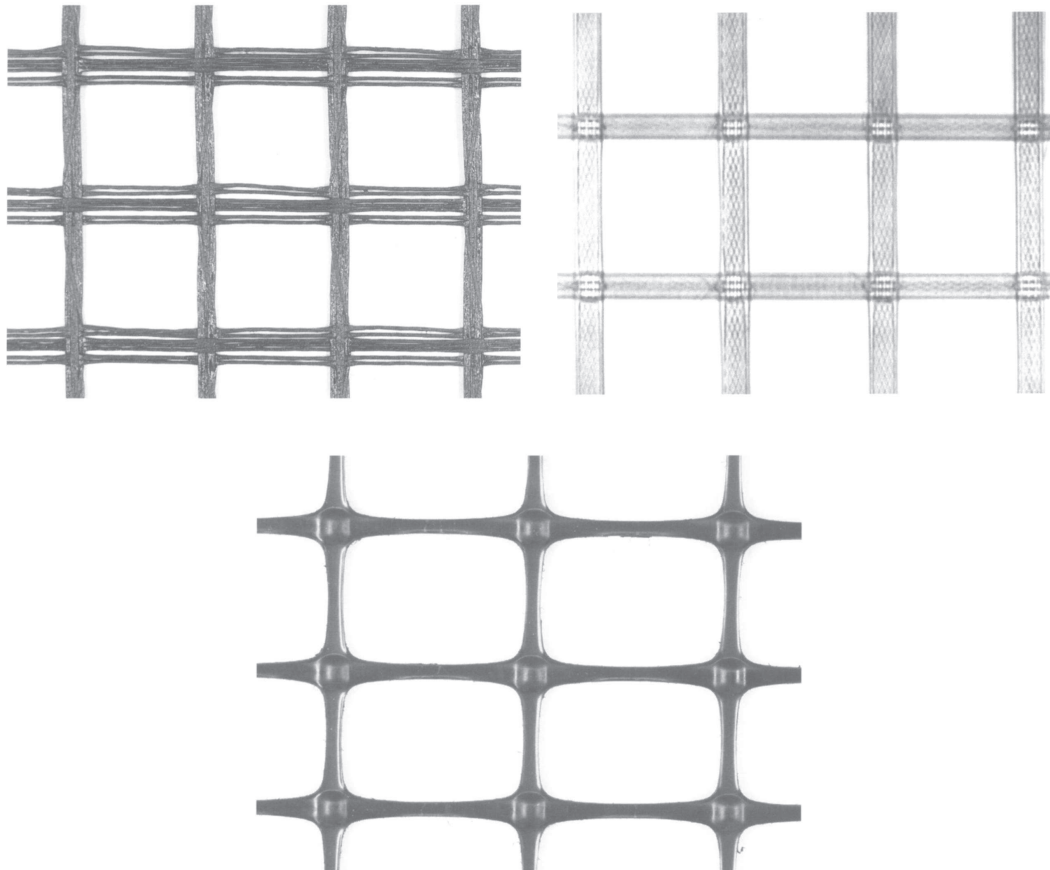
- **geowłókniny** - wytwarzane w postaci runa włókien o uporządkowanej lub przypadkowej orientacji, połączonych siłami tarcia i/lub kohezji i/lub adhezji (włókniny igłowane, przeszywane, łączone termicznie, chemicznie itp.) (rys. 2),



Rys. 2. Przykłady geowłóknin [43]

- **geodzianiny** - wytwarzane przez przeplatanie pętli jednej lub więcej przędz, włókien, filamentów lub innych elementów,

- **georuszty (geosiatki)** - płaskie struktury zawierające regularną, otwartą siatkę wewnątrznie połączonych elementów wytrzymałych na rozciąganie; georuszty są wytwarzane także technikami innymi niż tkackie: ciągnięte na gorąco, układane i sklepane, zgrzewane (rys. 3),

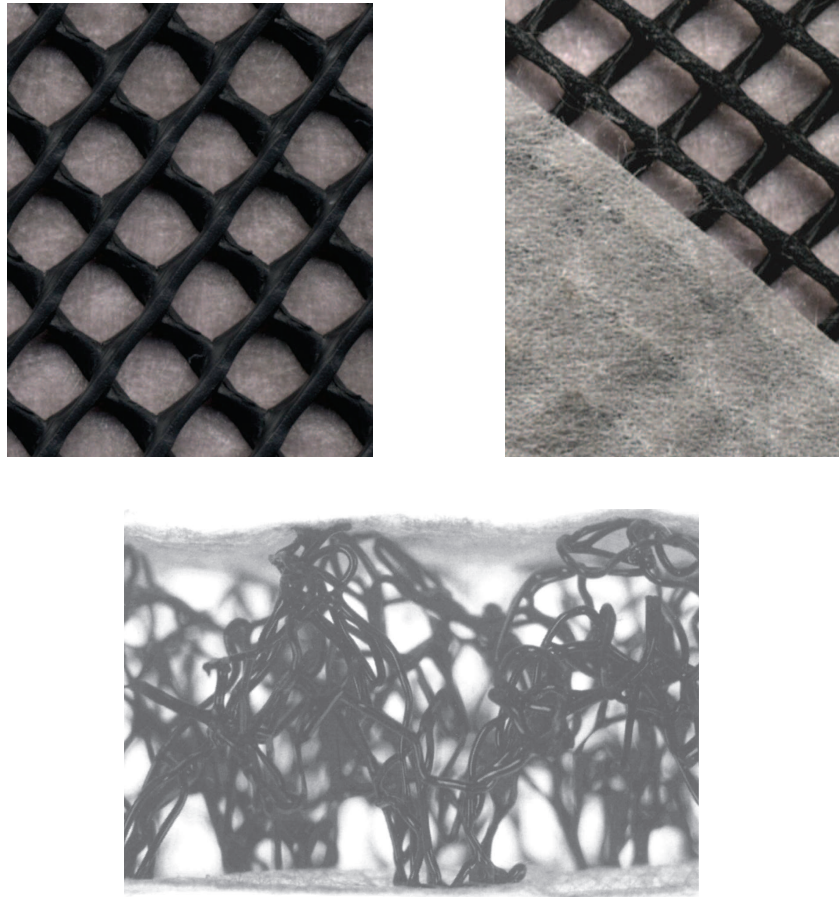


Rys. 3. Przykłady georusztów (geosiatek) [43]

- **geosieci** - płaskie struktury, których otwory są znacznie większe niż elementy składowe i w których oczka są połączone węzłami,
- **geokompozyty** - materiały złożone, mające w swym składzie co najmniej jeden wyrób geotekstylny lub pokrewny, grupa ta obejmuje bardzo zróżnicowane wyroby, połączone z różnymi materiałami polimerowymi, mineralnymi lub innymi (np. metalowymi); geokompozyty stosowane w budowlach ziemnych są złożone

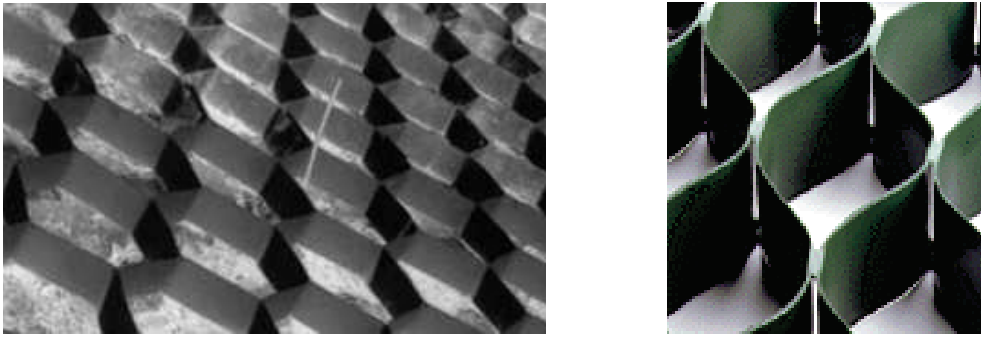
Geosyntetyki - geokraty, geowłókniny, geotkaniny, geokompozyty, geosiatki

z materiałów geotekstylnych (np. geosiatka lub georuszt zespolony z włókniną), a także dodatków mineralnych (piasku, ilu, bentonitu itp.), (rys. 4),



Rys. 4. Przykłady geokompozytów

- **wyroby geotekstylne pokrewne** - przepuszczalne polimerowe materiały konstrukcyjne, które mogą mieć postać arkusza lub taśmy, jest to też grupa bardzo różnorodnych wyrobów, trudnych do ogólnego zdefiniowania, do których stosuje się metody wytwarzania, kontroli i badań, typowe dla wyrobów geotekstylnych. Do wyrobów pokrewnych należą tzw. geosiatki komórkowe - wyroby o otwartej strukturze z połączonych taśm, tworzących "komórki" czworokątne lub sześciokątne ("plaster miodu"), wypełniane po ułożeniu zasypką (gruntem lub kruszywem), (rys. 5).



Rys. 5. Przykłady wyrobów geotekstylnych pokrewnych (geosiatki komórkowe)

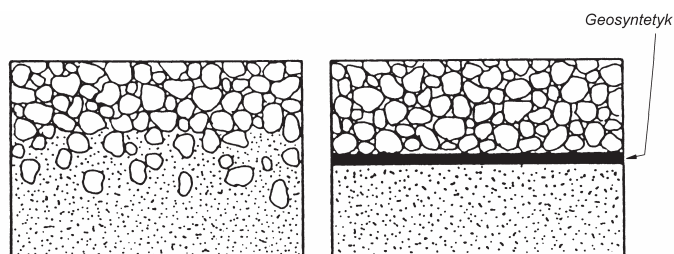
Do geosyntetyków należą także **geomembrany** - specjalne wyroby nieprzepuszczalne lub o bardzo małej przepuszczalności, cienkie i giętkie, stosowane jako wodoszczelne przepony do izolowania cieczy, ciał stałych lub gazów. Mają one postać arkuszy lub taśm z tworzywa sztucznego, najczęściej HDPE lub PP. Geomembrany stosowane w drogownictwie do uszczelnień mają zwykle grubość co najmniej 1,5 mm.

3. Funkcje geosyntetyków w budowlach ziemnych

W geotechnice oraz inżynierii komunikacyjnej, lądowej i wodnej powszechnie stosowane są geosyntetyki, do których należą m.in. geotekstyli, geomembrany i inne wyroby pokrewne.

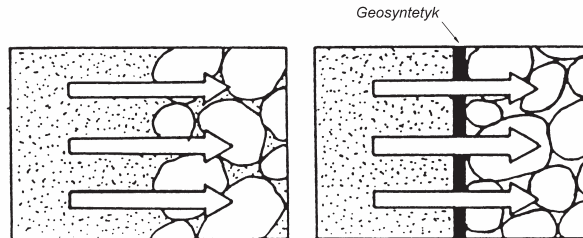
Zgodnie z normą PN-ISO 10318:1993 wyróżnia następujące podstawowe funkcje geotekstyliów w budowlach ziemnych:

- **rozdzielanie (separacja)** - zapobieganie mieszaniu się sąsiadujących gruntów lub kruszyw (bez utrudniania przepływu wody),

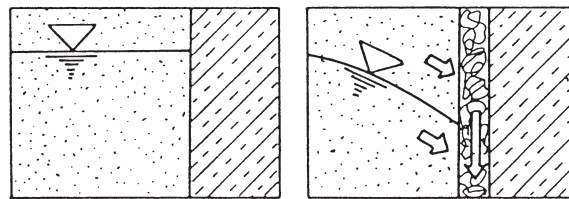


Geosyntetyki - geokraty, geowłókniny, geotkaniny, geokompozyty, geosiatki

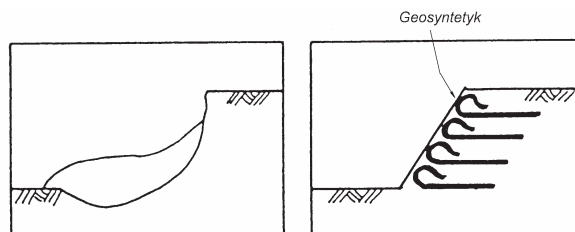
- **filtrowanie** - zatrzymywanie gruntu i innych cząstek poddanych ciśnieniu spływowemu na kontakcie z gruntem, przy zachowaniu przepływu cieczy (filtr odwrotny),



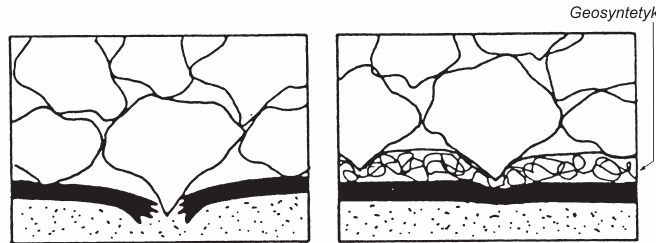
- **drenaż** - zbieranie wód opadowych, gruntowych i innych cieczy oraz gazów, przy umożliwianiu ich przepływu w płaszczyźnie wyrobu geotekstylnego (np. maty drenującej z ażurowym plastikowym rdzeniem ułatwiającym przepływ wody, osłoniętym z jednej lub z obu stron filtrem z włókniny albo filtrem z włókniny po jednej stronie, a folią uszczelniającą po drugiej, służą do odprowadzania wody np. z zasyпки za ścianami oporowymi),



- **wzmocnienie, zbrojenie** - wykorzystanie właściwości geotekstyliów przy rozciąganiu (wytrzymałości, sztywności) do poprawienia właściwości mechanicznych warstwy gruntu,



- **ochrona** - ograniczanie lub zapobieganie za pomocą wyrobu geotekstylnego miejscowym uszkodzeniom systemu geotechnicznego np. erozji powierzchni gruntu, przebiciu geomembran, przewodów rurowych lub instalacji.



W budowlach ziemnych wyroby geotekstylne mają też inne zastosowania, np.:

- opakowanie - nadanie wymaganej formy elementu, obejmujące:
 - pojemniki ("geoworki" różnej wielkości, walce - ang. *geotubes* o średnicy do 2 - 3 m i długości do 20 m), zapewniające uzyskanie określonej formy geometrycznej przez wypełnienie gruntem niespoistym, kruszywem kamiennym lub betonem, służące głównie do formowania konstrukcji zapobiegających erozji przez wody bieżące, fale morskie itp.,
 - gabiony - "kosze" wypełniane materiałem kamiennym,
- dreny taśmowe, złożone z rdzenia w osłonie z włókniny, używane do wglębnego odwadniania podłoża.

Wielokrotnie geotekstyli spełniają równocześnie kilka funkcji. Np. geowłóknina, zastosowana jako warstwa rozdzielająca grunt nasypu od słabego podłoża spoistego, stanowi też filtr zatrzymujący drobne cząstki gruntu oraz pewne wzmocnienie podstawy nasypu, szczególnie w początkowej fazie budowy, a w specjalnych przypadkach także może pełnić rolę warstwy drenującej, ułatwiającej odpływ wody wzdłuż płaszczyzny materiału.

Aprobaty techniczne IBDiM określają przeznaczenie wyrobów geotekstylnych w inżynierii komunikacyjnej, odpowiednio do ich właściwości, np. do:

- wykonywania warstw pośrednich w nawierzchniach bitumicznych, zmniejszających propagację spękań odbitych (pochodzących od skurczu termicznego lub technologicznego podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym) i przy poszerzeniach istniejących jezdni, jak również zapobiegających przenikaniu wody przez spękaną konstrukcję nawierzchni,
- wzmacniania górnej warstwy podłoża gruntowego nieulepszonych nawierzchni drogowych oraz dolnych warstw podbudowy podatnej w celu zmniejszenia zakresu wymiany słabych gruntów i zużycia materiałów kamiennych albo też wydłużenia okresu eksploatacji nawierzchni,

- budowy placów postojowych, parkingów, dróg tymczasowych, leśnych i rolniczych w trudnych warunkach gruntowo-wodnych,
- wykonywania warstw odcinających i rozdzielających między gruntem drobnoziarnistym (ilastym, gliniastym lub pylastym) a warstwami konstrukcyjnymi nawierzchni wykonywanymi z kruszywa,
- wzmacniania podbudowy poboczy dróg,
- budowy wzmocnionych skarp, zbrojonych nasypów i konstrukcji oporowych,
- stabilizacji osuwisk,
- wykonywania drenów odwadniających poziomych i pionowych,
- osłony systemów drenarskich w celu zabezpieczenia ich przed zamuleniem gruntem drobnoziarnistym,
- ochrony uszczelnień z geomembran przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz do drenażu liniowego i powierzchniowego pod geomembranami,
- separacji i wzmacniania słabego podłoża nasypów komunikacyjnych w celu poprawy jego stateczności oraz przyspieszenia konsolidacji,
- zbrojenia podstawy nasypów opartych na palach wzmacniających słabe podłoże oraz nad terenami występowania zapadlisk i pustek w podłożu (szkód górniczych, krasowych i podobnych)
- ograniczenia destrukcyjnego oddziaływania szkód górniczych na konstrukcję nawierzchni dróg,
- osłony przeciwoerozyjnej powierzchni skarp, zwłaszcza do czasu ukorzenienia okrywy roślinnej,
- systemów ciężkich osłon przeciwoerozyjnych (pod narzuty kamienne, okładziny betonowe) gruntu i skarp narażonych na okresowe lub stałe działanie wody.

4. Właściwości geosyntetyków

Wyroby geosyntetyczne charakteryzują m.in. następujące grupy właściwości:

- cechy geometryczne i masa powierzchniowa,
- właściwości fizyczno-mechaniczne,
- odporność na uszkodzenia mechaniczne podczas wbudowania i w czasie eksploatacji (pod obciążeniami cyklicznymi lub dynamicznymi),
- właściwości hydrauliczne,
- współczynnik tarcia, przyczepność,
- odporność fizyczno-chemiczna i biologiczna.

Ogólne wymagania dotyczące właściwości wyrobów stosowanych w budownictwie drogowym [23] oraz metody badań określa norma EN 13249. Podstawowe

informacje zawiera tablica 5.

Tablica 5. Wymagania dotyczące geotekstyliów i wyrobów pokrewnych stosowane w budownictwie drogowym według EN 13249

Właściwość	Metoda badań	Funkcja		
		Filtrowanie	Rozdzielanie	Zbrojenie
1. Wytrzymałość na rozciąganie ^b	PN-EN ISO 10319	H	H	H
2. Wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu	PN-EN ISO 10319	A	A	H
3. Wytrzymałość na rozciąganie szwów i połączeń	PN-EN ISO 10321	S	S	S
4. Przebiecie statyczne (CBR) ^{a,b}	PN-EN ISO 12236	S	H	H
5. Przebiecie dynamiczne	PN-EN 918	H	A	H
6. Tarcie	EN ISO 12957	S	S	A
7. Pełzanie przy rozciąganiu	PN-EN ISO 13431	–	--	S
8. Uszkodzenia podczas wbudowania	ENV ISO 10722-1	A	A	A
9. Charakterystyczny wymiar porów	PN-EN ISO 12956	H	A	--
10. Wodoprzepuszczalność w kierunku prostopadłym do powierzchni	PN-EN ISO 11058	H	A	A
11. Trwałość	EN 13249 zał. B	H	H	H
12.1. Odporność na starzenie w warunkach atmosferycznych	EN 12224	A	A	A
12.2. Odporność na degradację chemiczną	ENV ISO 12960 lub ENV ISO 13438, EN 12447	S	S	S
12.3. Odporność na degradację mikrobiologiczną	EN 12225	S	S	S

Oznaczenia: H: właściwość o znaczeniu zasadniczym

A: właściwość ważna we wszystkich warunkach stosowania

S: właściwość ważna w specyficznych warunkach stosowania

--: właściwość nieistotna dla danej funkcji

Uwagi:

a: Badanie to może nie mieć zastosowania w przypadku niektórych wyrobów, np. georusztów

b: Oznaczenie „H” w przypadku właściwości mechanicznych (wytrzymałość na rozciąganie i przebiecie statyczne) oznacza, że producent powinien zapewnić dane z obu badań. W specyfikacji wyrobu wystarczy zamieścić tylko jeden z tych parametrów.

Geosyntetyki - geokraty, geowłókniny, geotkaniny, geokompozyty, geosiatki

Wynika z niej, że dla funkcji rozdzielania wyrób geosyntetyczny powinien mieć zdefiniowane co najmniej następujące parametry:

- Wytrzymałość na rozciąganie
- Odporność na przebicie statyczne CBR
- Trwałość

Dla funkcji filtrowania wyrób geosyntetyczny powinien mieć zdefiniowane co najmniej następujące parametry:

- Wytrzymałość na rozciąganie
- Przebicie dynamiczne
- Charakterystyczny wymiar porów
- Wodoprzepuszczalność w kierunku prostopadłym do powierzchni
- Trwałość

Dla funkcji zbrojenia wyrób geosyntetyczny powinien mieć zdefiniowane co najmniej następujące parametry:

- Wytrzymałość na rozciąganie
- Wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu
- Odporność na przebicie statyczne CBR
- Przebicie dynamiczne
- Trwałość

W licznych zastosowaniach długotrwałych należy również określić wpływ pełzania.

Dla funkcji filtrowania i drenażu wyrób geosyntetyczny powinien mieć zdefiniowane co najmniej następujące parametry:

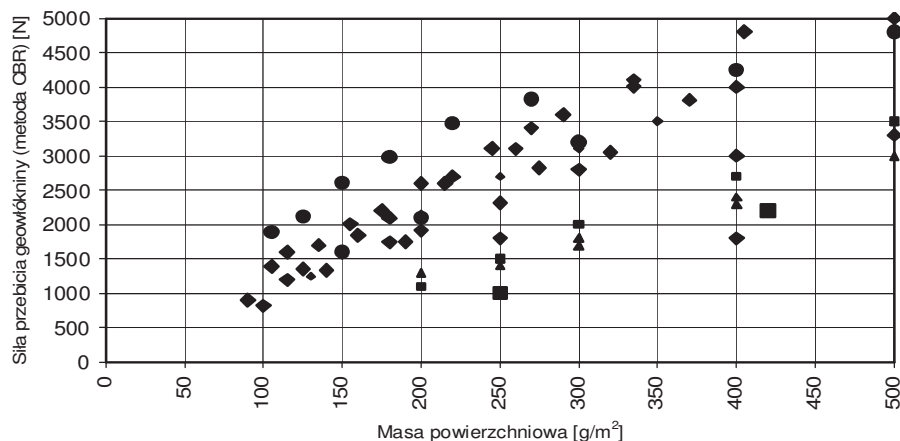
- Wytrzymałość na rozciąganie
- Przebicie dynamiczne
- Charakterystyczny wymiar porów
- Wodoprzepuszczalność w kierunku prostopadłym do powierzchni
- Zdolność przepływu wody w płaszczyźnie materiału
- Trwałość

Dla funkcji ochrony wyrób geosyntetyczny powinien mieć zdefiniowane co najmniej następujące parametry:

- Wytrzymałość na rozciąganie
- Wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu
- Odporność na przebicie statyczne CBR
- Przebicie dynamiczne
- Trwałość

W uzasadnionych przypadkach projektant może wymagać spełnienia przez wyrób geosyntetyczny dodatkowych wymagań.

Producent powinien również podać dla swoich wyrobów masę powierzchniową. Jest ona łatwym do sprawdzenia parametrem identyfikacyjnym, ale ma luźny związek z właściwościami mechanicznymi. Dlatego niedopuszczalne jest wybieranie wyrobów na podstawie tylko masy powierzchniowej. Na rys. 6 pokazano zależność siły przy przebiciu CBR od masy powierzchniowej kilku wybranych geowłóknin. Widać na nim jak mylące jest posługiwanie się tylko masą powierzchniową. Np. dla geowłókniny 250 g/m^2 siła przebicia CBR wynosi od 1 do 3,5 kN. Gdyby poszukiwać geowłókniny, dla której siła przebicia CBR wynosi 2 kN, to wymaganie to spełniają różne wyroby o masie od 125 do 420 g/m^2 .



Rys. 6. Zależność siła przebicia CBR – masa powierzchniowa dla wybranych geowłóknin

4.1. Cechy geometryczne i właściwości identyfikacyjne

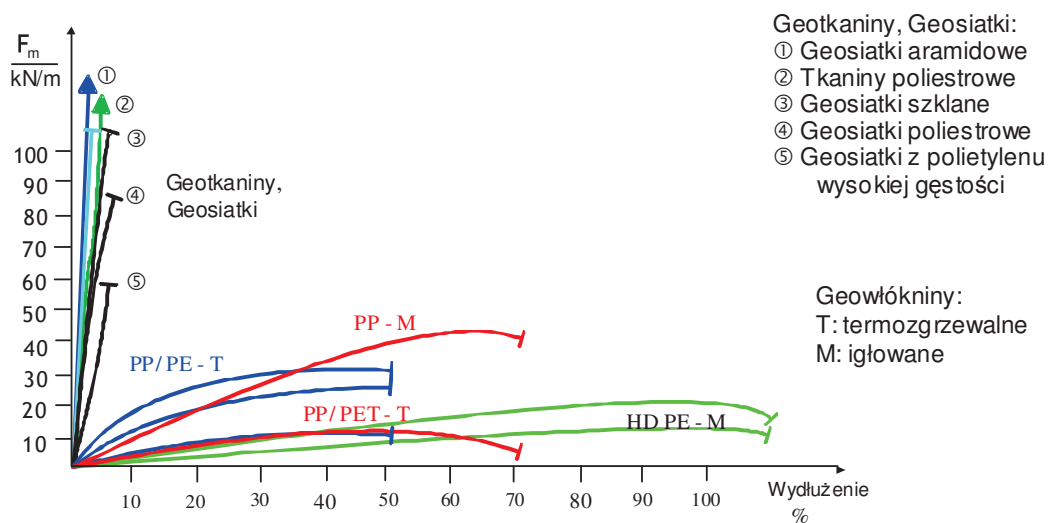
Według PN-ISO 10320:1995 obejmują one m.in. rodzaj polimeru, wymiary rolki lub arkusza wyrobu, masę powierzchniową według PN-EN 965:1999, dla włóknin grubość przy określonych naciskach badaną zgodnie z normą PN-EN 964-1:1999, dla geosiatek i georusztów - wielkość oczek.

4.2. Właściwości fizyczno-mechaniczne

Właściwości te obejmują zwykle:

- wytrzymałość i odkształcalność wyrobów, badane zgodnie z normą PN-ISO 10319:1996; ważnymi cechami zachowania materiału są wzbudzone siły oporu na rozciąganie przy różnych wydłużeniach jednostkowych np. 3%, 5% i 10% (sztywność, moduł sieczny) oraz wydłużenie przy zerwaniu,
- opór geowłóknin i geotkanin na przebicie statyczne (w warunkach adaptowanego badania CBR według PN-EN ISO 12236:1998) lub przebicie dynamiczne (metoda spadającego stożka według PN-EN 918:1999),
- w specjalnych przypadkach - wytrzymałość na rozciąganie szwów i połączeń według PN-ISO 10321:1997,
- pełzanie przy rozciąganiu - w odniesieniu do zbrojenia obciążonego długotrwale oraz pełzanie przy ściskaniu - w przypadku mat drenujących.

Właściwości fizyczno-mechaniczne poszczególnych wyrobów geotekstylnych różnią się między sobą. Na rys. 7 przedstawiono zależność między siłą a wydłużeniem dla różnych wyrobów geotekstylnych.



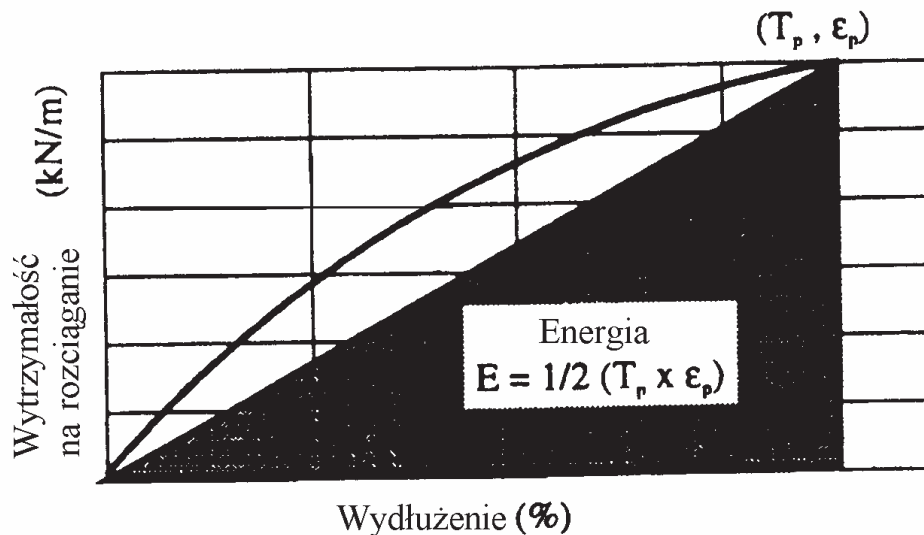
Rys. 7. Zależność siła rozciągająca – wydłużenie dla różnych wyrobów geotekstylnych [56]

Ostatnio w przepisach zagranicznych wprowadzono kryterium **energii zniszczenia** wyrobu przy zerwaniu [57]. Energię zniszczenia (rys. 8) przyjmuje się w przybliżeniu równą połowie iloczynu siły zrywającej (wytrzymałości) i wydłużenia przy zerwaniu (w procentach). Miarodajna jest mniejsza z wartości w kierunku

podłużnym i poprzecznym. Kryterium to uwzględnia łącznie dwie cechy materiału i uważa się, że lepiej pozwala porównywać różne rodzaje wyrobów np. włókniny i tkaniny.

W rzeczywistości wykres wydłużenie-siła przy rozciąganiu materiału jest krzywoliniowy, dzięki czemu energia potrzebna do zerwania jest większa. Różne rodzaje geosyntetyków (geowłóknin, geotkanin) zachowują się odmiennie. Stosunkowo mała jest wartość energii zniszczenia tkanin, średnia włóknin igłowanych, korzystnie zachowują się włókniny zgrzewane - wykazują dużą sztywność przy małych wydłużeniach oraz duże wydłużenia przed zerwaniem.

Wymagania dotyczące energii zniszczenia wprowadzono już do różnych dokumentów, m.in. do normy szwajcarskiej SN 670 241 (patrz p. 6.1), normy norweskiej lub projektu normy francuskiej.



Rys. 8. Energia zniszczenia [57]

4.3. Właściwości hydrauliczne

Podstawowe parametry hydrauliczne wyrobu to:

- wodoprzepuszczalność prostopadła do płaszczyzny wyrobu k_v ,
- wodoprzepuszczalność w płaszczyźnie wyrobu k_h ,
- charakterystyczny wymiar porów O_{90} lub O_{95} .

Badania tych parametrów są istotne w przypadku funkcji filtracyjnej geotekstyliów, mają też znaczenie w odniesieniu do funkcji rozdzielania. Właściwości hydrauliczne badane są według norm ISO lub EN i ich wersji krajowych.

Wodoprzepuszczalność prostopadłą do płaszczyzny wyrobu k_v bada się np. zgodnie z PN-EN ISO 11058:2002 (bez obciążenia) lub z projektem E DIN 60500 Teil 4:1997 (pod obciążeniami 2, 20 i 200 kPa). Wodoprzepuszczalność w płaszczyźnie wyrobu k_h bada się zgodnie z np. PN-EN ISO 12958:2002 (pod różnymi obciążeniami).

Z właściwościami hydraulicznymi jest ściśle związana zdolność zatrzymywania cząstek gruntu (filtrowania). Miarą jej jest wartość charakterystycznego wymiaru porów O_{90} lub O_{95} (wymiar ziaren znormalizowanego gruntu, którego 90% lub 95% masy zostanie zatrzymane) badanego np. według PN-EN ISO 12956:2002 lub BS 6906 Pt 2. Geowłókniny stosowane jako warstwy rozdzielające mają zwykle wymiar O_{90} od 0,06 do 0,2 mm, geotkaniny z tasiemek od 0,06 do 0,4 mm.

Zestawienie parametrów geotekstyliów występujących w aprobatkach IBDiM z podziałem na grupy wyrobów przedstawiono w tablicach:

- geowłókniny - tablica 6,
- geotkaniny - tablica 7,
- geosiatki (georuszty) - tablica 8,
- geokompozyty (np. włókniny połączone z siatkami lub tkaninami) - tablica 9.

W zestawieniach uwzględniono dla każdego wyrobu tylko parametry występujące w aprobatkach, z czego wynika pozorna ich niespójność (np. grubości przy różnych naciskach).

Tablica 6. Właściwości geowłóknin

Lp.	Parametr	Jednostki	Wartości parametrów	Metody badań
1	Masa powierzchniowa	g/m ²	90÷1200	PN-EN 965
2	Grubość przy nacisku: 2 kPa 20 kPa 200 kPa	mm mm mm	0,4÷9,9 0,7÷8,7 0,3÷5,5	PN-EN 964-1
3	Wytrzymałość na rozciąganie: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	kN/m kN/m	4,0÷48 5,0÷110	PN ISO 10319
4	Wydłużenie względne przy obciążeniu maksymalnym: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	% %	20÷170 25÷140	
5	Siła przy przebiciu (metoda CBR) (x - s)	kN	0,7÷13,5	PN-EN ISO 12236
6	Średnica otworu przy dynamicznym przebiciu (metoda spadającego stożka)	mm	0÷50	PN-EN 918
7	Charakterystyczny wymiar porów O ₉₀	μm	25÷180	PN-EN ISO 12956
8	Wskaźnik prędkości przepływu wody prostopadłego do płaszczyzny geowłókniny	mm/s	1,3÷150	PN-EN ISO 11058

Tablica 7. Właściwości geotkanin

Lp.	Parametr	Jed- nostki	Wartości parametrów	Metody badań
1	Masa powierzchniowa	g/m ²	86÷2296	PN-EN 965
2	Grubość przy nacisku 2 kPa	mm	0,3÷3,0	PN-EN 964-1
3	Wytrzymałość na rozciąganie: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	kN/m kN/m	11,0÷1000 9,0÷200	PN ISO 10319
4	Wydłużenie względne przy obciążeniu maksymalnym: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	% %	8÷35 6÷25	
6	Średnica otworu przy dynamicznym przebiciu (metoda spadającego stożka)	mm	6÷19	PN-EN 918
7	Charakterystyczny wymiar porów O ₉₀	μm	45÷1650	PN-EN ISO 12956
8	Wskaźnik prędkości przepływu wody prostopadłego do płaszczyzny geotkaniny	mm/s	0,2÷200	PN-EN ISO 11058

Tablica 8. Właściwości geosiatek (georusztów)

Lp.	Parametr	Jed- nostki	Wartości parametrów	Metody badań
1	Masa powierzchniowa	g/m ²	108÷1550	PN-EN 965
2	Wytrzymałość na rozciąganie: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	kN/m kN/m	13÷500 9÷200	PN ISO 10319
3	Wydłużenie względne przy obciążeniu maksymalnym: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	% %	2÷17 2÷20	
4	Siła rozciągająca przy wydłużeniu względny 2 %: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	kN/m kN/m	3,3÷50,0 3,0÷30,0	
5	Siła rozciągająca przy wydłużeniu względny 3 %: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	kN/m kN/m	4,0÷250,0 1,0÷130,0	
6	Siła rozciągająca przy wydłużeniu względny 5 %: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	kN/m kN/m	5,7÷125,0 5,0÷50,0	

Tablica 9. Właściwości geokompozytów

Lp.	Parametr	Jed- nostki	Wartości parametrów	Metody badań
1	Masa powierzchniowa	g/m ²	140÷1100	PN-EN 965
2	Grubość przy nacisku: 2 kPa 20 kPa 200 kPa	mm mm mm	1,9 ÷ 15,0 1,6÷4,0 0,9÷2,6	PN-EN 964-1
3	Wytrzymałość na rozciąganie: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	kN/m kN/m	8,0÷230,0 8,0÷200,0	PN ISO 10319
4	Wydłużenie względne przy obciążeniu maksymalnym: -wzdłuż pasma -wszerz pasma	% %	2÷50 2÷75	
5	Siła przy przebiciu (metoda CBR) (x - s)	kN	1,2÷3,0	PN-EN ISO 12236
6	Charakterystyczny wymiar porów O ₉₀	μm	63÷180	PN-EN ISO 12956
7	Wskaźnik prędkości przepływu wody prostopadłego do płaszczyzny geokompozytu	mm/s	0,1÷2,9	PN-EN ISO 11058

4.4. Odporność na uszkodzenia mechaniczne podczas wbudowania

Odporność na uszkodzenia związana jest z właściwościami mechanicznymi i strukturą wyrobu. W zastosowaniach geowłóknin i geotkanin do separacji i filtrowania w przepisach niemieckich [52, 77] odporność tych wyrobów określana jest zwykle na podstawie klasy wytrzymałości GRK (Geotextilrobustklasse). Zasady określania wartości GRK podano w Załączniku nr 1.

Dla wyrobów stosowanych jako zbrojenie gruntu wymagane są zwykle próby na budowie. Badanie służy do określenia współczynnika redukcji wytrzymałości wyrobu po wbudowaniu (zasypaniu i zagęszczeniu zasypki), a następnie odkopaniu wyrobu. Warunki wbudowania mogą też być symulowane na podstawie prób laboratoryjnych.

4.5. Tarcie po gruncie (przyczepność)

Współczynnik tarcia ma istotne znaczenie w przypadku zbrojenia gruntu oraz materiałów układanych na skarpach. Wartości tarcia między gruntem a materiałem można badać w specjalnych aparatach skrzynkowych (normy prEN ISO 12957-1:1997 oraz prEN ISO 12957-2:1997). W szczególnych przypadkach badane jest tarcie po innych materiałach.

Współczynnik tarcia między gruntem zasypki a materiałem geosyntetycznym jest zwykle w granicach:

- po geowłókninach i geotkaninach $f = (0,6 \div 0,7) \operatorname{tg} \Phi_z$
- po geosiatkach (georusztach) $f = (0,8 \div 1,0) \operatorname{tg} \Phi_z$

gdzie Φ_z - kąt tarcia wewnętrznego materiału zasypki. W gruntach spoistych można uwzględnić też wpływ przyczepności (adhezji).

W przypadku braku danych doświadczalnych zaleca się przyjmować minimalną wartość tarcia geosyntetyku po gruncie $f_{\min} = 0,5 \operatorname{tg} \Phi_z$, a po geosyntetyku $f_{\min} = 0,2$.

4.6. Trwałość geotekstyliów

Trwałość geotekstyliów w przeciętnych warunkach jest bardzo duża, wystarczająca do potrzeb budownictwa drogowego.

Znaczenie czynnika trwałości zależy od rodzaju zastosowania. Mniej istotne jest przy zastosowaniach krótkoterminowych, np. jako:

- warstwy rozdzielcze pod układanym gruntem nasypowym, traktowane jako wspomaganie technologiczne, potrzebne głównie w momencie wbudowania;
- zbrojenie nasypów na słabym podłożu, którego nośność w wyniku konsolidacji gruntu wzrasta z czasem na tyle, że może samo przejąć obciążenie.

Zasadnicze znaczenie ma trwałość w przypadku zastosowań długoterminowych w odniesieniu do:

- wytrzymałości i odkształcalności - zbrojenia masywów gruntowych (konstrukcji oporowych, stromych skarp, nasypów na palach), których bezpieczeństwo powinno zostać zapewnione przez wytrzymałość geotekstyliów, a także wzmacniania podłoża nawierzchni,
- wodoprzepuszczalności filtrów w systemach odwadniających.

O trwałości decydują odporność na działanie czynników klimatycznych (atmosferycznych) oraz na wpływy chemiczne i biologiczne. Ogólnie wyroby należy chronić przed dłuższym działaniem światła. Wyroby są zazwyczaj stabilizowane na działanie promieni UV dodatkami np. sadzy, dzięki czemu mogą być odporne na

nawet długotrwałą ekspozycję. Zalecane jest jednak szybkie wbudowanie geotekstyliów i przykrycie ich gruntem. Jeśli geotekstylia nie są przykrywane gruntem w dniu wbudowania, to powinny być poddane badaniu na przyspieszone starzenie w warunkach atmosferycznych wg EN 12224. Odporność na czynniki klimatyczne określa się, badając wytrzymałość materiału przed i po poddaniu go w specjalnym urządzeniu działaniu promieni UV o znormalizowanym natężeniu i energii naświetlania, z okresowym zraszaniem. Maksymalny czas pomiędzy wbudowaniem a zakryciem gruntem geotekstyliów podano w tablicy 10.

Tablica 10. Maksymalny czas pomiędzy wbudowaniem a zakryciem gruntem geotekstyliów [wg PN-EN 13249]

Zastosowanie	Zbrojenie lub inne funkcje, w których wytrzymałość długoterminowa jest istotnym parametrem	Inne zastosowania
Wytrzymałość określona po badaniu		
> 80 %	1 miesiąc	
od 60 % do 80 %	2 tygodnie	
od 20 % do 60 %		2 tygodnie
< 20 %		1 dzień

Odporność na wpływy chemiczne badana jest za pomocą kąpeli w odpowiednich roztworach. W przypadku geotekstyliów narażonych na oddziaływanie gruntów o $\text{pH} < 4$ lub $\text{pH} > 9$ zaleca się przeprowadzenie badań wg PN-EN 14030:2002 (U). Metoda A powinna być zastosowana do gruntów o $\text{pH} < 4$, a metoda B do gruntów o $\text{pH} > 9$. W obu przypadkach procentowa wytrzymałość określona pod koniec badania powinna być większa niż 50 % wytrzymałości na początku badania.

W przypadku zastosowań, w których wytrzymałość długoterminowa jest istotnym parametrem, mogą być konieczne dodatkowe badania służące określeniu współczynników redukcyjnych przyjmowanych do obliczeń wytrzymałości długotrwałej. Wyniki badań powinny być interpretowane w odniesieniu do lokalnych warunków terenowych (oddziaływanie chemiczne i temperatura).

Wymagania dotyczące właściwości wyrobów budownictwa drogowego zawiera norma EN 13249. Geotekstylia zastosowane w gruntach naturalnych o pH między 4 i 9, temperaturze do $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ i nie pełniące funkcji zbrojenia oraz wykonane z poliestru, polietylenu, polipropylenu, poliamidu 6 lub poliamidu 6.6 i nie zawierające surowców

wtórnych mogą być uważane za zachowujące dostateczną trwałość co najmniej przez pięć lat.

Geotekstylia zastosowane w gruntach naturalnych o pH między 4 i 9, temperaturze do 25 °C i wykonane z poliestru, polietylenu, polipropylenu, poliamidu 6 lub poliamidu 6.6, i nie zawierające surowców wtórnych mogą być uważane za zachowujące dostateczną trwałość co najmniej przez dwadzieścia pięć lat, pod warunkiem że pomyślnie przeszły badania: odporności na hydrolizę (poliester, poliamid 6, poliamid 6.6), odporności na utlenianie (polipropylen, polietylen, poliamid 6, poliamid 6.6).

Geotekstylia wytworzone z poliestru, poliamidu 6 lub poliamidu 6.6 powinny zostać poddane badaniu odporności na hydrolizę wg EN 12447. Minimalna wytrzymałość określona pod koniec badania odporności na hydrolizę powinna wynosić 50% wytrzymałości na początku badania.

Geotekstylia wytworzone z polipropylenu, polietylenu, poliamidu 6 lub poliamidu 6.6 powinny zostać poddane badaniu odporności na utlenianie wg ENV ISO 13438. Minimalna wytrzymałość określona pod koniec badania odporności na utlenianie powinna wynosić 50 % wytrzymałości na początku badania.

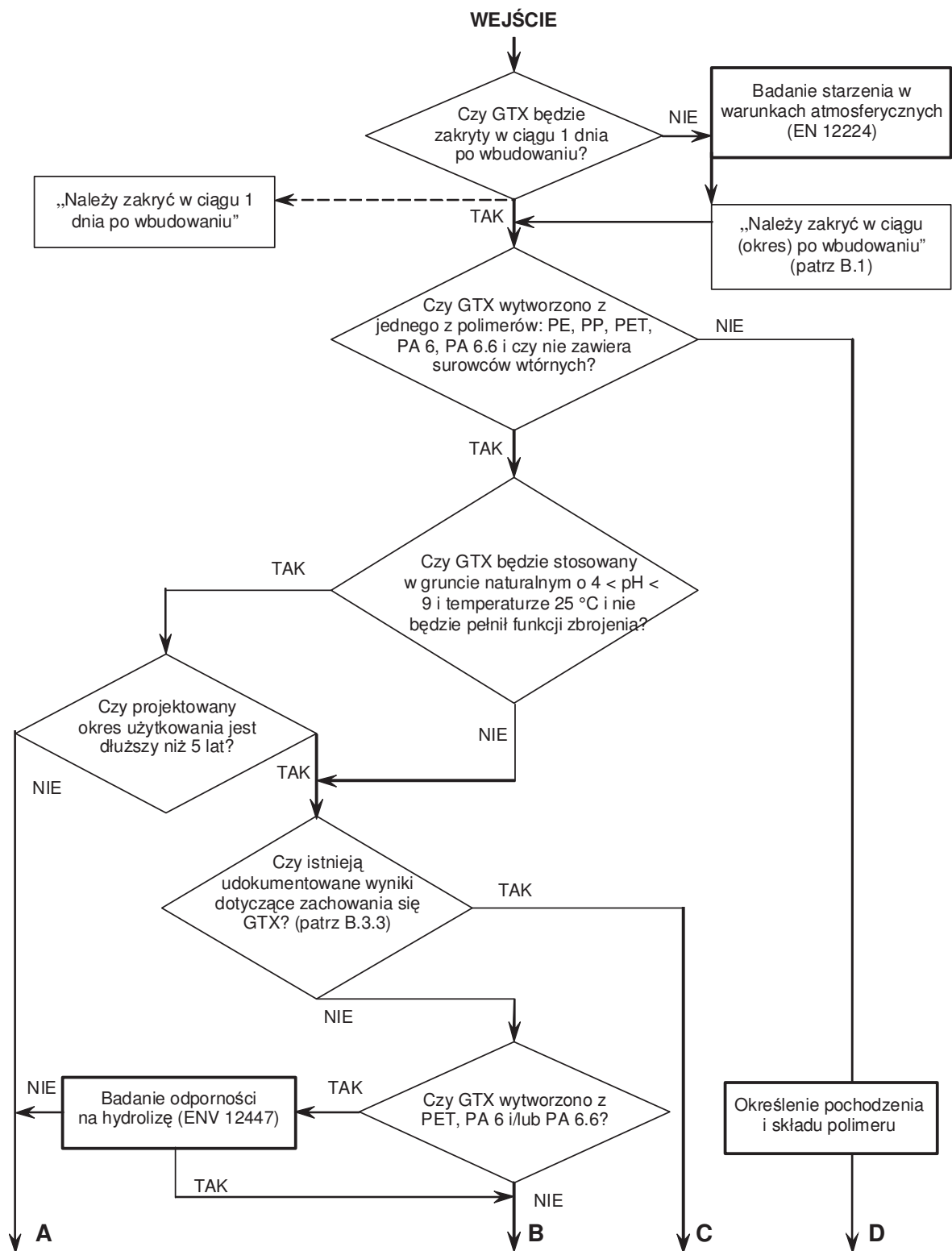
W przypadku:

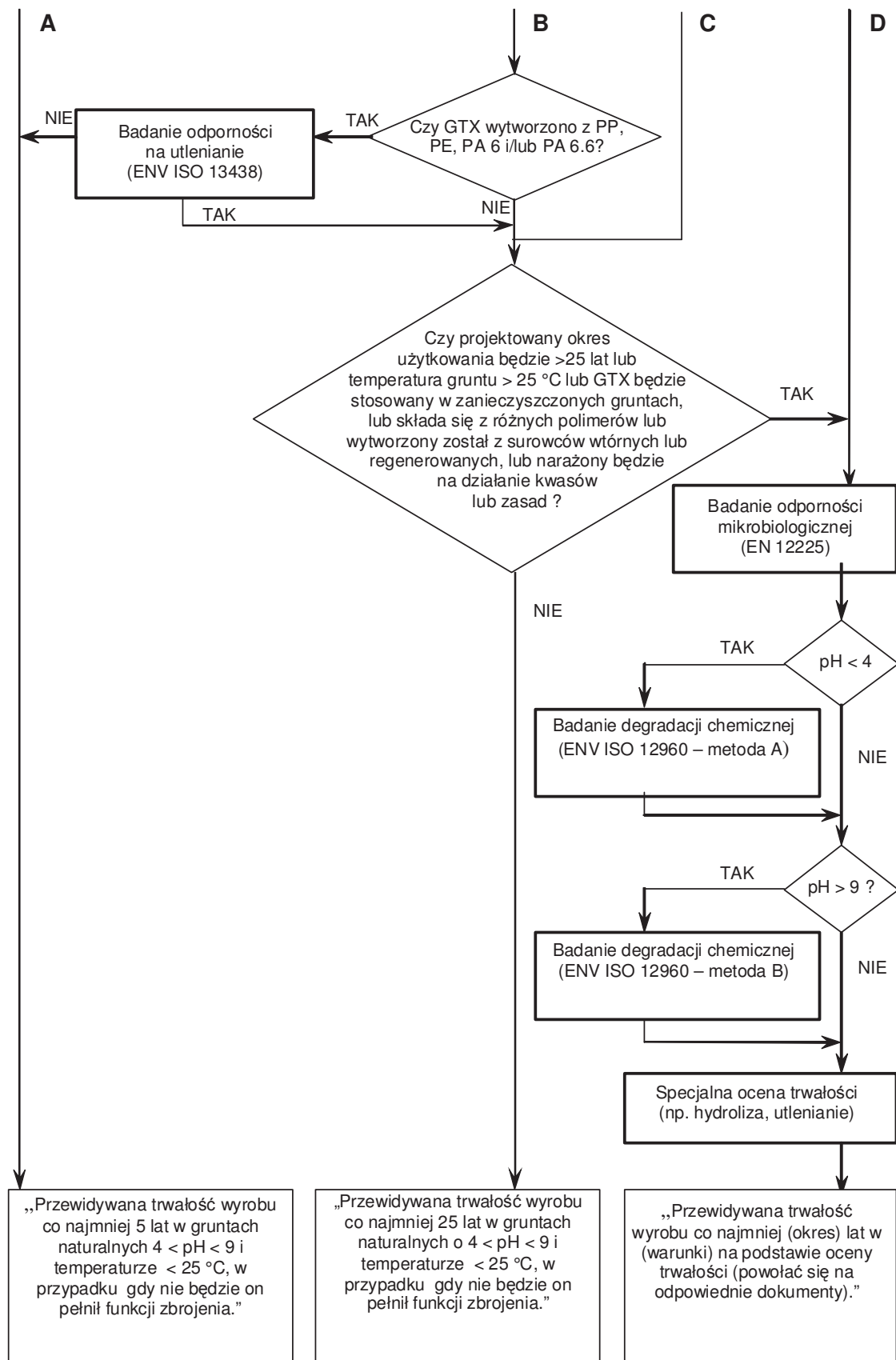
- okresu eksploatacji powyżej 25 lat,
- gruntu o temperaturze powyżej 25 °C,
- zastosowania w gruntach zanieczyszczonych, szczególnie w obecności soli amonowych,
- geotekstyliów wytworzonych z różnych polimerów oraz kompozytów, które nie mogą być badane na odporność na hydrolizę i utlenianie,
- gdy w skład geotekstyliów wchodzi surowce wtórne,
- zastosowania geotekstyliów i wyrobów pokrewnych w środowiskach o wysokiej kwasowości lub silnie zasadowych,

trwałość geotekstyliów należy oceniać w odniesieniu do lokalnych warunków użytkowania. W takich przypadkach należy wykonać również badania odporności na wpływy mikrobiologiczne wg EN 12225.

Poniżej przedstawiono na schemacie sposób oceny trwałości wg EN 13249 (rys. 9).

Rys. 9. Sposób oceny trwałości wg EN 13249





4.7. Wytrzymałość obliczeniowa (długoterminowa) geotekstyliów

W przypadkach, gdy geotekstylia pracują jako zbrojenie, należy dla założonego okresu eksploatacji, obciążeń i środowiska przyjmować do obliczeń wytrzymałość długoterminową. Np. według przepisów niemieckich [53] w metodzie naprężeń dopuszczalnych użytkową obliczeniową wytrzymałość zbrojenia F_d wyznacza się ze wzoru:

$$F_d = \frac{F_k}{A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times \gamma} \text{ [kN/m]}$$

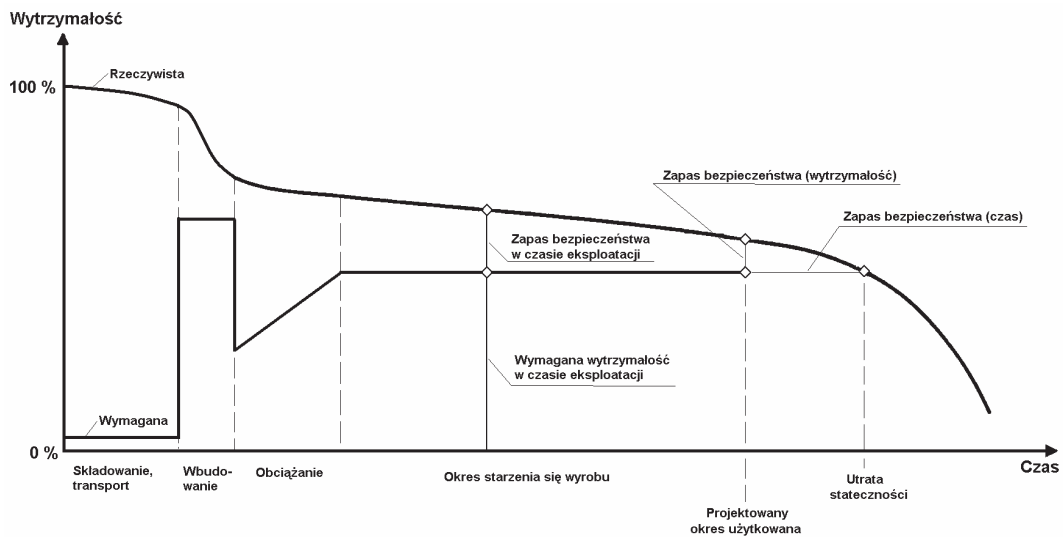
w którym:

- F_k - wytrzymałość doraźna (krótkotrwała), określana jako gwarantowana przez producenta wartość charakterystyczna wytrzymałości zbrojenia (np. podana w Aprobacie Technicznej),
- γ - współczynnik bezpieczeństwa (uwzględniający m.in. odchylenia wymiarów i właściwości wbudowanych materiałów od wartości nominalnych oraz odchylenia wykonanej budowli od projektu): wartości współczynnika zależą od metody obliczeń [70]: w metodzie naprężeń dopuszczalnych wg DIN $\gamma = 1,75$, w metodzie stanów granicznych częściowe współczynniki bezpieczeństwa np. wg DIN V 1054-100 w stanie podstawowym (eksploatacji) $\gamma_B = 1,40$, w stanie budowlanym $\gamma_B = 1,30$, w stanie wyjątkowym (np. wstrząsy sejsmiczne, powodzie) $\gamma_B = 1,20$,
- A_1 - współczynnik redukcyjny, uwzględniający wpływ odkształceń pod długotrwałym obciążeniem (pełzania) oraz spadek wytrzymałości po wymaganym okresie użytkowania (np. 120 lat), określany na podstawie badań pełzania danego materiału; w przypadku braku badań można przyjmować wartości: 2,5 dla poliestrów oraz 5 dla polietylenu i polipropylenu, w przypadku wykonania badań możliwe jest dla niektórych wyrobów osiągnięcie wartości 1,6 dla poliestrów i 2,4 dla polietylenu,
- A_2 - współczynnik redukcyjny, uwzględniający wpływ uszkodzeń materiału podczas transportu, wbudowania i zagęszczania nasypu; wartość jego zależy od rodzaju gruntu, wyrobu i sposobu zagęszczania, w przypadku braku badań można przyjmować wartości: 1,5 dla kruszyw naturalnych drobnych i 2,0 dla kruszyw naturalnych grubych, w przypadku wykonania badań możliwe jest dla niektórych wyrobów osiągnięcie wartości 1,0÷1,3 dla kruszyw naturalnych i poniżej 2,0 dla kruszyw łamanych,
- A_3 - współczynnik redukcyjny, uwzględniający wpływ zmniejszenia nośności na połączeniach i szwach, w przypadku braku połączeń równy 1,

A₄- współczynnik redukcyjny, uwzględniający odporność chemiczną i biologiczną, w budowlach drogowych, dla gruntów lub kruszyw nieagresywnych równy 1, dla agresywnych powinny być wykonane badania uwzględniające lokalne warunki.

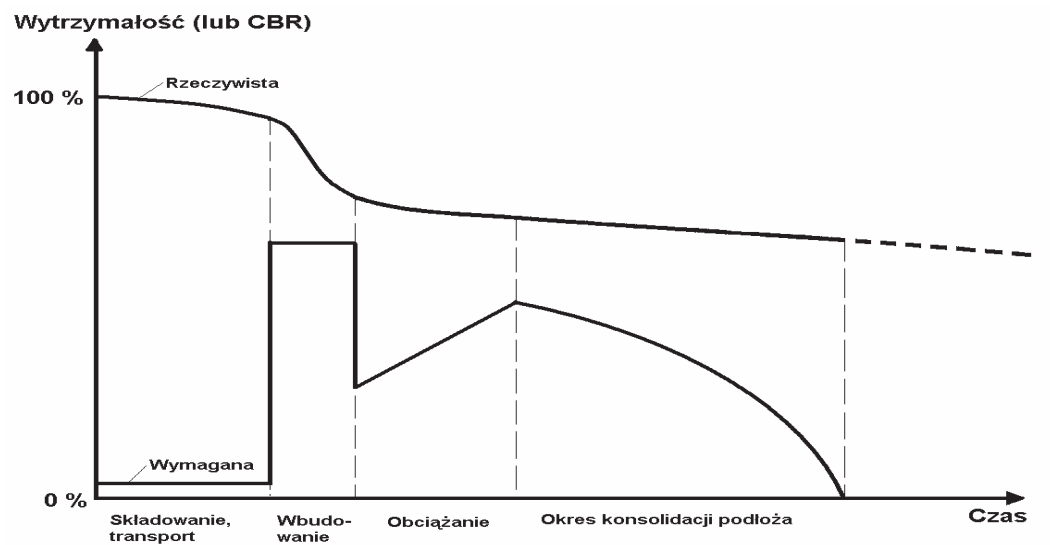
Podobne zasady obowiązują w Wielkiej Brytanii, a parametry materiałowe i współczynniki redukcyjne są podawane w certyfikatach dopuszczających wyrób do stosowania.

Na rys. 10 pokazano przebieg w czasie zmian parametrów wytrzymałościowych geotekstyliów pełniących funkcję zbrojenia.



Rys. 10. Zmiany w czasie wymaganych i rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych geotekstyliów pełniących funkcję zbrojenia

Dla porównania na rys. 11 pokazano zmiany parametrów wytrzymałościowych geotekstyliów w czasie pełniących funkcję rozdzielania. Widać z niego, że największe obciążenia działają na wyrób w czasie wbudowywania.



Rys. 11. Zmiany w czasie wymaganych i rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych geotekstyliów pełniących funkcję rozdzielania

5. Wybór wyrobów geosyntetycznych

W tablicy (tablica 11) zestawiono przegląd zastosowań wyrobów geotekstylnych.

Geosyntetyki - geokraty, geowłókniny, geotkaniny, geokompozyty, geosiatki

Funkcje geosyntetyków	ROZDZIELANIE (SEPARACJA)	FILTROWANIE	DRENAŻ	WZMOCNIENIE, ZBROJENIE	WZMOCNIENIE NAWIERZCHNI NIEULEPSZONYCH
Rodzaje materiałów	Geowłókniny, geotkaniny, geowłókniny wzmocnione	Geowłókniny, geotkaniny	Maty drenujące, geowłókniny	Geotkaniny, geosiatki i georuszty o małym pełzaniu, wyjątkowo maty komórkowe	Geowłókniny, geotkaniny, geosiatki, georuszty, geowłókniny wzmocnione, maty komórkowe
Zasada działania	Zapobieganie mieszanii się różnych gruntów lub kruszyw	Zatrzymywanie cząstek gruntu	Zbieranie wód i gazów, ułatwianie odpływu	Poprawa właściwości mechanicznych gruntu, przejęcie sił rozciągających	Poprawa właściwości mechanicznych gruntu
Typowe rodzaje zastosowań	Nasypy na słabym podłożu, podbudowy, nawierzchnie z kruszyw	Ostony drenów z rur lub kruszywa; gabionów	Odwodnienie za ścianami oporowymi, pod nasypami, wysypiskami	Nasypy na słabym podłożu, na palach Strome skarpy, ściany oporowe, stabilizacja osuwisk; ograniczenie wpływu szkód górniczych	Dolne warstwy podbudowy i górne podłoża, drogi tymczasowe
Istotne właściwości	Wytrzymałość na przebicie, wydłużenie przy zerwaniu, przepuszczalność, wymiar porów	Wymiar porów, przepuszczalność, wytrzymałość, trwałość	Przepuszczalność, wymiar porów, wytrzymałość, trwałość	Wytrzymałość, sztywność przy rozciąganiu; pełzanie; tarcie po gruncie; odporność na uszkodzenia i starzenie	Wytrzymałość, sztywność; przepuszczalność
Korzyści z zastosowania	Wzrost nośności i trwałości. Poprawa odwodnienia	Zapobieganie sufozji gruntu i kolmatacji drenów	Skuteczne odwodnienie, wzrost nośności i trwałości	Wzrost nośności i trwałości; oszczędność materiałów i kruszyw, powierzchni zajętego terenu	Wzrost nośności i trwałości nawierzchni; oszczędność kruszyw

Tablica 11 cd.

Funkcje geosyntetyków	OCHRONA SKARP PRZED EROZJĄ	OCHRONA PRZED PRZEBICIEM	USZCZELNIENIA	OPAKOWANIE, SZALUNEK
Rodzaje materiałów	Maty płaskie, przestrzenne; maty komórkowe; geowłókniny, gęste geosiatki; biowłókniny	Grube geowłókniny, geowłókniny wzmocnione	Geomembrany, geomaty bentonitowe	Geotkaniny, geowłókniny wzmocnione, geokontenery, geotuby
Zasada działania	Zapobieganie rozmyciu powierzchni gruntu; wspomaganie okrywy roślinnej.	Zapobieganie przebiciu izolacji z geomembran	Uniemożliwienie filtracji cieczy i zanieczyszczeń	Zapewnienie odpowiedniego kształtu po napełnieniu gruntem lub betonem
Typowe rodzaje zastosowań	Powierzchnie skarp budowli ziemnych	Ochrona uszczelnień zbiorników, rowów	Uszczelnienia zbiorników, rowów	Umocnienia dna i brzegów cieków; worki, walce, kosze, gabiony; lico ścian oporowych
Istotne właściwości	Wytrzymałość, wydłużenie przy zerwaniu; możliwość wzrostu roślin	Wytrzymałość na przebicie, grubość, masa powierzchniowa	Szczelność, wytrzymałość na przebicie, odporność na starzenie	Wytrzymałość, przepuszczalność, wymiar porów
Korzyści z zastosowania	Zwiększenie stateczności i trwałości; mniejsze koszty utrzymania	Trwałość i skuteczność uszczelnień	Ochrona podłoża i wód gruntowych przed skażeniami	Kontrolowane formowanie trwałych lub czasowych obudów i zabezpieczeń

6. Zastosowania geosyntetyków do wzmacniania podłoża nawierzchni

Geosyntetyki są obecnie najpowszechniej stosowanym materiałem budowlanym do wzmacniania podłoża i budowy konstrukcji z wykorzystaniem gruntu. W krajowym budownictwie drogowym były stosowane już w latach 70-tych, np. [58, 61]. Istnieje bogate piśmiennictwo, poświęcone geosyntetykom, ich zastosowaniu, badaniom i projektowaniu, zarówno krajowe np. [14, 15, 17, 22, 23, 26, 34, 36, 39, 40, 41, 48, 49, 60, 63, 64, 65, 66, 79, 86], jak i zagraniczne [29, 36, 43, 62, 68, 83].

6.1. Warstwy rozdzielające

Warstwy rozdzielające z geosyntetyków są stosowane do wzmacniania podłoża i warstw konstrukcyjnych nawierzchni podatnych (zwłaszcza ich podbudowy w czasie, gdy odbywa się ruch budowlany) oraz dróg z nawierzchnią nieulepszoną (drogi żwirowe, rolnicze, leśne oraz drogi technologiczne na budowach, parkingi, place postojowe itp.). Istnieją dwa rodzaje zastosowań:

- warstwy typowo rozdzielające np. oddzielające korpus nasypu od słabego podłoża, zwykle o module odkształcenia $E_2 > 30 \text{ MPa}$ (w takim przypadku zalecane są materiały o wytrzymałości co najmniej 8 kN/m , oraz dużej odkształcalności - włókniny o wydłużeniu przy zerwaniu co najmniej 40%), materiały te powinny zapewniać swobodny przepływ wody;
- rozdzielająco-wzmacniające np. układane w podłożu nawierzchni, pomiędzy słabym gruntem rodzimym (zwykle o module odkształcenia E_2 od 10 do 30 MPa) a kruszywem (podbudową pomocniczą lub ulepszonym podłożem), które powinny być dobierane na podstawie potrzebnej klasy wytrzymałości GRK lub wymiarowane na podstawie obliczeń statycznych nawierzchni.

Warstwy rozdzielające powinny spełniać kryteria wytrzymałości, trwałości oraz wodoprzepuszczalności i filtrowania podane w rozdziałach 4, 8.

Wzmocnienie słabego podłoża nawierzchni ulepszonych i nieulepszonych jest wymagane, gdy moduł wtórny odkształcenia podłoża E_2 jest mniejszy od wartości wymaganej przez odpowiednie przepisy. Np. według przepisów niemieckich minimalna wartość modułu E_2 na powierzchni podłoża wynosi 45 MN/m^2 . Podłoże można wzmocnić przez wymianę gruntu albo przez użycie zbrojenia geosyntetycznego. Zgodnie z wytycznymi [23] zastosowanie warstwy geosyntetycznej jako wzmocnienia podłoża jest zalecane, jeżeli jego moduł E_2 jest mniejszy od 30 MN/m^2 , a grubość warstwy potrzebnej wymiany gruntu byłaby nadmierna (w przypadku wartości modułu większej od 30 MN/m^2 użycie geosyntetyku jest nieefektywne). W takim przypadku, aby zachować projektowaną niweletę i grubość warstw konstrukcji nawierzchni, należy usunąć górną warstwę

słabego gruntu i po wyrównaniu powierzchni ułożyć materiał geosyntetyczny. Zalecane jest użycie geosyntetyków o sztywności co najmniej zapewniającej przy rozciąganiu siłą 10 kN/m wydłużenie $\leq 3\%$ (w każdym kierunku). Potrzebne wzmocnienie oraz grubość układanej na nim warstwy podbudowy pomocniczej z kruszywa są określone w projekcie nawierzchni, lecz powinna ona wynosić co najmniej 30 cm. Grubość warstw nawierzchni powinna też spełniać wymagania związane z głębokością przemarzania.

Geosyntetyki do warstw rozdzielająco-wzmacniających dobiera się zwykle metodami uproszczonymi. Różne zalecenia zawierają liczne publikacje i poradniki producentów geosyntetyków. Dobór materiałów uwzględnia różne kryteria: wytrzymałość (wskaźnik CBR) lub odkształcalność (moduł E_0 lub E_2) podłoża pod materiałem geosyntetycznym, rodzaj, uziarnienie i odkształcalność warstwy nasypu nad geosyntetykiem, a także warunki obciążenia ruchem budowlanym, dopuszczalną głębokość koleiny itp.

Poniżej podano dwa przykłady sposobów doboru geosyntetyków. W tablicy (tablica 13) zamieszczono wymagania na podstawie normy szwajcarskiej SN 640 592 według [69]. Dane wyjściowe do wymiarowania to:

- klasa nośności podłoża S0, S1, S2, S3 lub S4 według tablicy (tablica 12) (zależna od miarodajnej wartości CBR lub modułu E_1),
- rodzaj materiału warstwy kruszywa A, B lub C,
- obciążenie ruchem (iloczyn liczby i ciężaru pojazdów): do 500 MN oraz ponad 500 MN.

Tablica 12. Kryteria podziału na klasy nośności podłoża

Klasa nośności podłoża	Wartość CBR %	Moduł E_1 MN/m ²	Wytrzymałość na ścinanie $c_{u,k}$ kN/m ²	Minimalna grubość warstwy kruszywa h_k , cm
S0 - bardzo słabe	1 - 3	3 - 6	30 - 90	40
S1 - słabe	> 3 - 6	> 6 - 15	> 90 - 180	30
S2 - przeciętne	> 6 - 12	> 15 - 30	–	20
S3 - mocne i S4 - bardzo mocne	> 12	> 30	–	20

W tablicy (tablica 12) zamieszczono także wymagane minimalne grubości warstwy kruszywa ponad geosyntetykiem. W tablicy (tablica 13) podano wymagane wartości parametrów mechanicznych geosyntetyków przeznaczonych do wbudowania jako warstwa rozdzielcza drogowych i kolejowych budowli ziemnych:

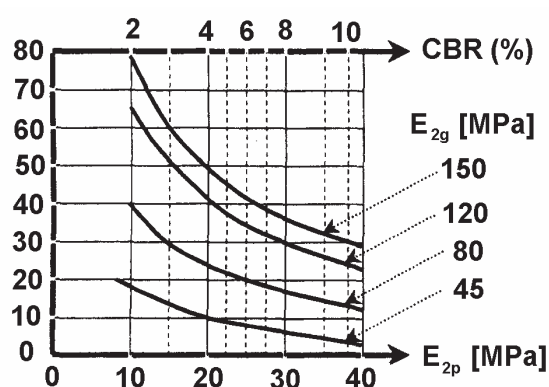
- R_{min} [kN/m] – minimalna doraźna wytrzymałość geosyntetyku na rozciąganie,

- $(R * \epsilon)_{\min}$ [kN/m %] — minimalny iloczyn wytrzymałości i wydłużenia przy obciążeniu maksymalnym,
- $O_{\max}$ [mm] – maksymalna średnica otworu przy dynamicznym przebicciu stożkiem.

Tablica 13. Wymagane wartości parametrów mechanicznych geosyntetyków

Klasa nośności podłoża	Parametry mechaniczne	BUDOWLE DROGOWE I ZIEMNE Drogi budowlane, korpusy nasypów, obwałowania						BUDOWLE KOLEJOWE (do 2 m poniżej podsypki)		
		Obciążenie ruchem do 500 MN			Obciążenie ruchem > 500 MN					
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
S0 b. słabe	$R_{\min}$ $(R * \epsilon)_{\min}$	12 360	14 420	16 480	14 420	16 480	18 540	14 420	16 480	18 540
S1 słabe	$R_{\min}$ $(R * \epsilon)_{\min}$	10 300	12 360	14 420	12 360	14 420	16 480	14 420	16 480	18 540
S2 prze- ciętne	$R_{\min}$ $(R * \epsilon)_{\min}$	6 180	8 240	10 300	8 240	10 300	12 360	14 420	16 480	18 540
S3 i S4 mocne	$R_{\min}$ $(R * \epsilon)_{\min}$	6 180	8 240	10 300	8 240	10 300	12 360	14 420	16 480	18 540
S0 - S4	$O_{\max}$	35	30	25	35	30	25	20	20	20

Na rys. 12 podano nomogram do wymiarowania potrzebnej grubości warstwy kruszywa układanej ponad geosyntetykiem w przypadku, gdy wytrzymałość powierzchni podłoża jest niewystarczająca ($E_{2p} < 45$ MPa). Grubość kruszywa określana jest w zależności od wtórnego modułu odkształcalności E_{2g} na powierzchni gruntu pod geosyntetykiem lub wartości wskaźnika CBR oraz wtórnego modułu odkształcalności E_{2g} warstwy kruszywa ponad geosyntetykiem.



Rys. 12. Grubość [cm] warstwy kruszywa ponad geosyntetykiem [70]

Geosyntetyki układa się zwykle wzdłuż nawierzchni, z poprzecznym zakładem pasm co najmniej 50 cm, ewentualnie łącząc pasma. W przypadku układania

w poprzek nawierzchni zakład pasm powinien wynosić co najmniej 50 cm. Zasypkę układa się od czoła. Niedopuszczalny jest ruch bezpośrednio po geosyntetykach. Warstwę kruszywa zagęszcza się do wymaganego, możliwego do uzyskania, wskaźnika zagęszczenia (zwykle $I_s = 1,0$).

Skuteczność wzmocnienia można sprawdzić np. przez pomiar wtórnego modułu odkształcenia podłoża E_2 , który powinien być nie mniejszy od 45 MN/m^2 . Miarodajny jest wynik badania po co najmniej 3 - 4 dniach po zagęszczeniu warstwy kruszywa.

6.2. Nawierzchnie nieulepszone

Nawierzchnie nieulepszone z kruszywa (żwirowe, tłuczniowe itp.) definiuje się jako nawierzchnie, których materiał nie jest związany spoiwem lub lepiszczem.

Można do nich zaliczyć również niezwiązane podbudowy z kruszywa, po których odbywa się ruch budowlany. W takim przypadku wykonana podbudowa może być traktowana jako nawierzchnia nieulepszona. dojazd tymczasowy lub trwały.

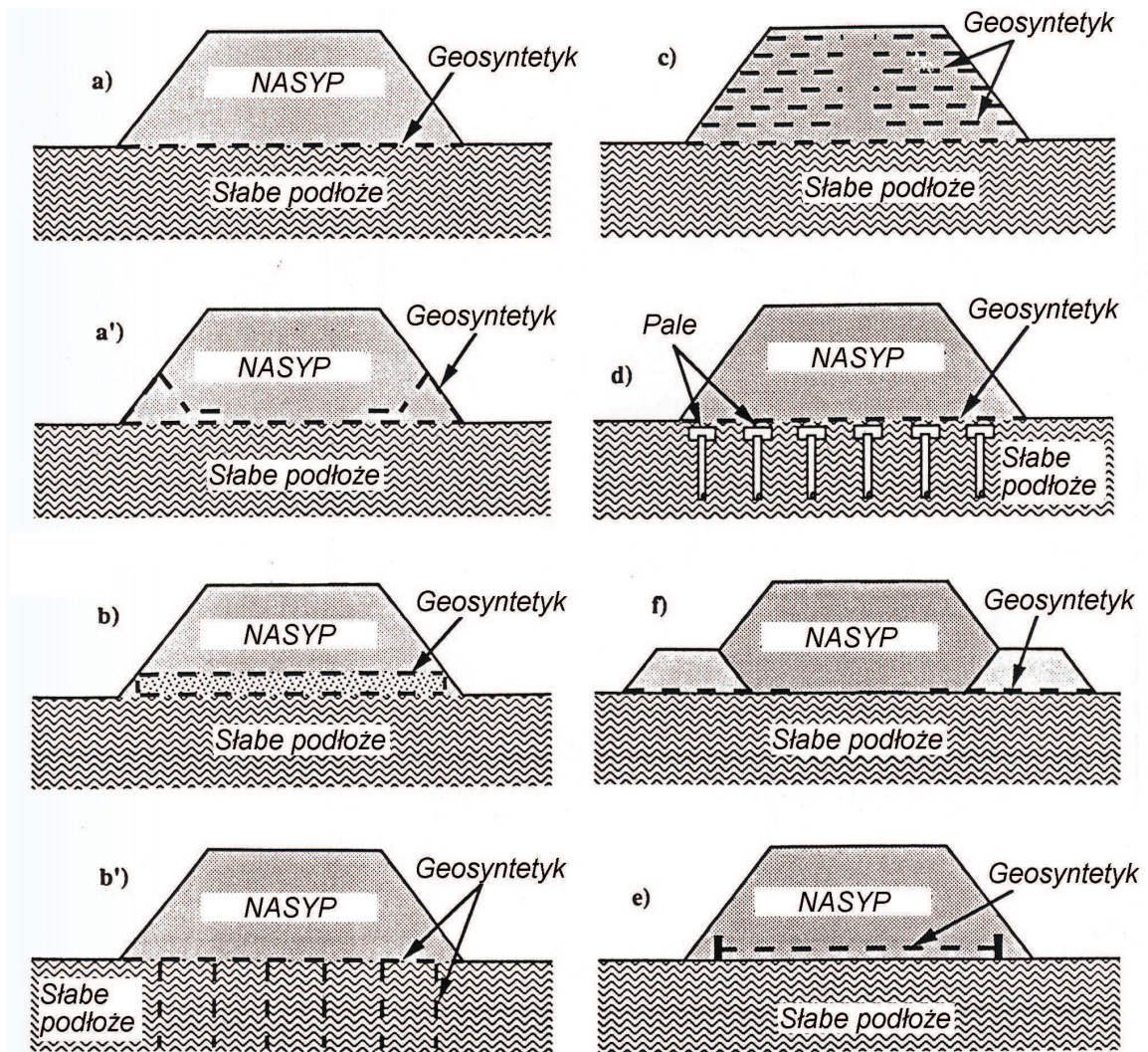
W załączniku 2 przedstawiono przykładowy sposób projektowania nawierzchni nieulepszonych [29].

7. Zastosowania geosyntetyków do wzmacniania słabego podłoża nasypów

7.1. Wprowadzenie

Wzmocnienie nasypów geotekstyliami stosuje się w rozmaitych sytuacjach i z różnym przeznaczeniem. Główne zastosowania geotekstyliów to:

- ochrona powierzchni i zbrojenie skarp pozwalające na ich bardziej strome, a nawet pionowe kształtowanie (obszernie przedstawione w dostępnym piśmiennictwie, np. [22, 23, 30, 34, 36, 45, 63, 86],
- zbrojenie dolnej części nasypów w celu zapobieżenia ich nadmiernym odkształceniom lub utracie stateczności w przypadku budowy nasypu na słabym i ściśliwym podłożu np. [29, 30, 62, 68, 82];
- zapobieganie nadmiernym i nieciągłym odkształceniom nasypów na obszarach narażonych na deformacje zapadliskowe jak tereny płytkiej eksploatacji górniczej, lejów sufozyjnych lub krasowych itp. (vide np. [30, 72]).



Rys. 13. Zastosowania geotekstyliów w nasypach na słabym podłożu

Różne możliwości technologiczne zastosowania i usytuowania geotekstyliów w nasypie ilustruje rys. 13 [36].

- a) Geotekstylia umieszczone na styku nasypu i słabego podłoża spełniają rolę rozdzielającą, zapobiegając mieszaniu materiału nasypu i podłoża, a jednocześnie zbrojenia wzmacniającego podłoża.
- a') Geotekstylia zagięte na końcach w formie pętli w celu zapewnienia zakotwienia oraz zapobieżenia poślizgowi.
- b) Materiał geotekstylny jest ułożony na warstwie gruntu, która spełnia rolę materaca rozkładającego obciążenie, a także warstwy drenującej.
- b') Warstwa drenująca jest powiązana z drenami pionowymi przyspieszającymi odpływ wyciskanej wody i konsolidację podłoża.

- c) Zbrojenie z geotekstyliów umożliwiające budowę stromych skarp.
- d) Zbrojenie w połączeniu z układem pali betonowych, kolumn wibrobetonowych, tłuczniowych, cementowo-wapiennych lub t.p., które przenoszą całość lub część ciężaru nasypu.
- e) Zbrojenie z elementami kotwiącymi na końcach, zapobiegającymi poślizgowi.
- f) Zbrojenie pod przyporami poprawiającymi stateczność nasypu.

Zastosowanie zbrojenia z warstw geotekstyliów umieszczonych w podstawie nasypu poprawia jego stateczność, natomiast najczęściej ma niewielki wpływ na redukcję osiadania. W celu kontrolowania (ograniczenia, przyśpieszenia) osiadań stosuje się zbrojenie geotekstyliami w połączeniu z innymi zabiegami lub konstrukcjami, jak np. wymiana gruntu, zastrzyki, geodreny lub elementy nośne (pale, kolumny tłuczniowe), nad którymi układana jest warstwa geotekstylina rozkładająca obciążenie nasypem. Rozwiązania te nie wchodzą w zakres opracowania.

7.2. Dobór materiałów geotekstylnych

Do zbrojenia nasypów stosuje się całą gamę wyrobów geotekstylnych i geokompozytowych: tkaniny, różne rodzaje włóknin, włókniny wzmocnione specjalnymi włóknami, siatki, przestrzenne ruszty typu "plastra miodu". Różnorodność form jest związana z funkcją tych materiałów: stanowią one nie tylko zbrojenie, lecz mogą również rozdzielać grunty pełniąc rolę filtru lub też są warstwą drenażową.

Funkcja rozdzielania jest istotna w przypadku dużych deformacji, które powodują powstanie spękań na spodzie nasypu. Przenikanie w nie słabego gruntu podłoża pogarszałoby właściwości mechaniczne nasypu. W takim przypadku stosuje się geokompozyty z wysokowytrzymałych siatek i geowłókniny o dużej wydłużalności, spełniające rolę separatora, pod warunkiem jednak, że ich pory spełniają wymagania stawiane filtrom.

Dobór materiału zbrojenia nie jest sprawą prostą. Głównymi parametrami materiału jest jego wytrzymałość na rozciąganie oraz siła $[kN/m]$ wzbudzana przy określonych wydłużeniach (zwykle 2% lub 3%, 5% i 10%) albo moduł odkształcalności J $[kN/m]$. Należy również uwzględnić zmiany wytrzymałości i pełzanie materiału geotekstylnego, nawet w przypadku, gdy stanem krytycznym jest krótkotrwała faza początkowa pracy zbrojenia. Wymagania zależą od projektowanego okresu użytkowania konstrukcji. Zgodnie z normą prEN 14475 konstrukcje tymczasowe mają okres użytkowania do 5 lat, przy dłuższym są traktowane jako trwałe.

Wytrzymałość zmniejszają, nawet o 30%, uszkodzenia spowodowane zagęszczaniem pokrywającego gruntu. O pracy zbrojenia gruntu w budowlach ziemnych decyduje też

zakotwienie jego końców, uzyskiwane za pomocą specjalnych rozwiązań, bądź - najczęściej - przez tarcie. Ogólnie kąt tarcia gruntu po geosyntetyku F_g jest mniejszy od kąta tarcia wewnętrznego gruntu. Większy kąt tarcia F_g , bliski kątowi tarcia gruntu, obserwuje się w przypadku geosiatek. Orientacyjne wartości kąta tarcia dla poszczególnych materiałów i rodzajów gruntów powinny być podawane przez producentów, a do konkretnych zastosowań zweryfikowane doświadczalnie.

Włókniny zasadniczo nie są materiałem przeznaczonym do zbrojenia gruntu, lecz produkowane są specjalne włókniny wzmocnione lub kompozyty, odznaczające się dużą i trwałą wytrzymałością.

7.3. Konstrukcja nasypów ze zbrojeniem z geosyntetyków

7.3.1. Nasypy na słabym podłożu

Nasyp na podłożu o dużej ściśliwości doznaje osiadań, zwykle największych w pobliżu osi. Powodują one zachowanie się nasypu jak tarczy zginanej. Zbrojenie z geotekstyliów w podstawie nasypu - jak w tarczy żelbetowej - przejmuje naprężenia rozciągające, zapobiegając spękanom i ograniczając odkształcenia poprzeczne nasypu. Zbrojenie poprawia stateczność korpusu nasypu przeciwdziałając wypieraniu podłoża na boki, ale nie zmniejsza istotnie osiadań związanych z jego ściśliwością. Powoduje jednak, że osiadania są bardziej równomierne.

Zbrojenie jest najbardziej efektywne w dolnej części nasypu. Ma ono korzystniejsze warunki pracy, gdy nie kontaktuje się bezpośrednio ze słabym gruntem, lecz jest położone na warstwie gruntu nasypu, która powinna być oddzielona od podłoża warstwą nie ulegającą kolmatacji włókniny. Jednak na torfach korzystne jest pozostawienie powierzchniowej warstwy trawiastej. Rozwiązaniem tego rozwiązania jest podstawa w formie materaca z dobrze przepuszczalnego gruntu otoczonego materiałem geotekstylnym (rys. 13b), tworzącego duży gabion. Warstwa taka spełnia też rolę drenażu, potrzebnego zwłaszcza, gdy korpus nasypu jest zbudowany z gruntu słabo przepuszczalnego np. spoistego.

Pasma materiału zbrojenia układane są zwykle prostopadle do osi nasypu, ciągle - bez połączeń. Lokalne niejednorodności podłoża i samego nasypu wywołują rozciągania działające także wzdłuż nasypu. Dlatego korzystne jest, gdy pasy materiału mają dużą szerokość. Rozciąganie podłużne pasów powoduje ich skrócenie poprzeczne. Łączenie pasów tylko przez układanie na zakład nie jest zalecane, wskazane jest łączenie ich szwami. Zalecane jest, by zakład pasów był nie mniejszy od 50 cm, a szew nie bliżej niż 20 cm od krawędzi. Alternatywą w przypadku użycia dość wąskich pasów materiału jest zbrojenie dwukierunkowe o konstrukcji "materacowej"

z przeplatanych pasów prostopadłych i równoległych do osi nasypu. Rozwiązanie to jest chronione patentem IBDiM. Zastosowano je z powodzeniem na wielu obiektach.

W nasypach na bardzo ściśliwym podłożu, w celu ograniczenia osiadań, stosowane są ostatnio poza zbrojeniem z geotekstyliów zasypki z lekkich materiałów (np. popioły, lekkie kruszywa, a nawet bloki ze styropianu).

7.3.2. Podstawy projektowania zbrojenia nasypów

Formalną podstawą obliczeń budowli ziemnych są normy: na posadowienia bezpośrednie PN-81/B-03020 i projektowania ścian oporowych PN-83/B-03010. Jednak obie te normy, a zwłaszcza norma na ściany oporowe, nie uwzględniają projektowania gruntu zbrojonego geotekstyliami. Tak więc mogą one stanowić pomoc i wskazówkę, lecz nie podstawę projektowania. Drugim problemem, związanym ze specyficznymi właściwościami geotekstyliów, jest konieczność uwzględniania w projektowaniu ich przewidywanych odkształceń. Dlatego obliczenia powinny być prowadzone dla zbliżonych do rzeczywistych obciążeń charakterystycznych, a nie obliczeniowych, które są powiększone o pewne współczynniki obciążenia. Komplikuje to stosowanie wynikających z norm wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa. W p. 4.7 podano proponowane wartości "globalnych" i częściowych współczynników bezpieczeństwa wzorowane na przepisach zagranicznych, z których zaczerpnięta jest metodyka obliczeń.

Trudnym zagadnieniem jest wymiarowanie zbrojenia z geotekstyliów, gdyż konieczne jest uwzględnianie m.in. zmian ich właściwości w czasie (patrz p. 4.7). Konieczne są badania tych materiałów przez producentów, by zakres dostarczanych parametrów był zgodny z wymaganiami norm EN.

Stateczność nasypu na słabym podłożu zależy głównie od wytrzymałości na ścinanie gruntu pod nasypem, czyli od nośności podłoża. Jeśli sprawdzenie klasycznymi metodami wykaże, że jest ona wystarczająca, to zbrojenie nie jest potrzebne. Zbrojenie umieszczone w podstawie nasypu ma zapobiegać zniszczeniu go przez ścięcie gruntu tak w nasypie, jak i w jego podłożu. Zbrojenie zmniejsza odkształcenia poprzeczne nasypu i ogranicza odkształcenia plastyczne słabego gruntu, natomiast redukcja osiadań konsolidacyjnych podłoża jest niewielka i ma znaczenie drugorzędne.

Najczęściej decydującą o stateczności jest faza wznoszenia nasypu. Powodem tego jest mała przepuszczalność podłoża, nie pozwalająca na pełną jego konsolidację w czasie budowy. Po jej zakończeniu działa pełne obciążenie nasypu, wywołujące wzrost ciśnienia wody w porach słabego gruntu spoistego, które zmniejsza naprężenia efektywne. Przyrost wytrzymałości podłoża wskutek konsolidacji jest początkowo mały i może być niewystarczający do zapewnienia stateczności. Z czasem, w miarę

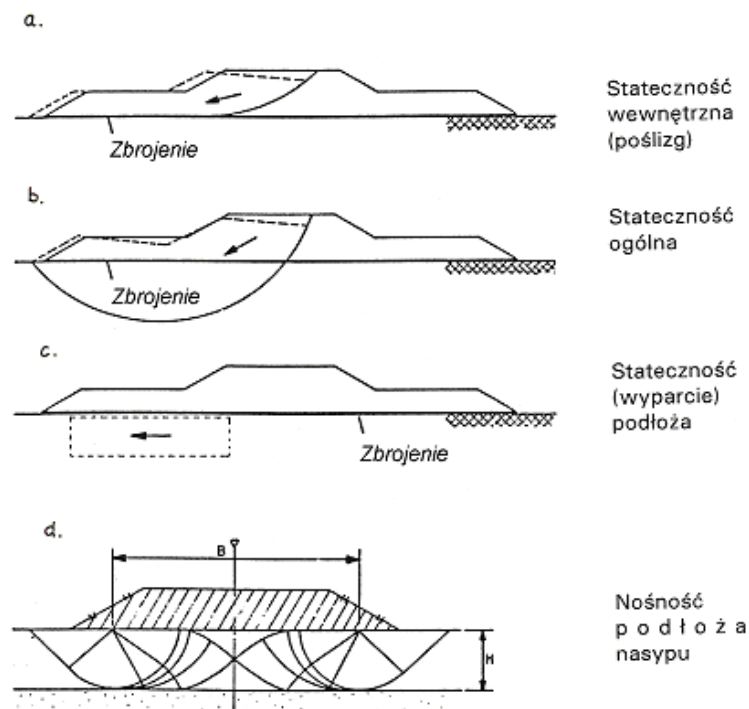
konsolidacji podłoża następuje wzrost jego wytrzymałości, dzięki czemu zbrojenie przestaje być konieczne do zapewnienia stateczności. Zatem zbrojenie podłoża nasypu zwykle jest potrzebne przez ograniczony czas.

W przypadku nasypu bez zbrojenia w podstawie, wskutek małej nośności podłoża musi on być wznoszony stopniowo, z długimi przerwami, z bardzo łagodnymi skarpami lub przyporami bocznymi, poszerzającymi nasyp oraz zwiększającymi objętość robót ziemnych i zajmowany teren. Dzięki zastosowaniu zbrojenia poprawiającego początkową stateczność nasypu, można zwiększyć pochylenie i ograniczyć szerokość skarp nasypu.

Obliczenia stateczności nasypu wykonywane są dwoma sposobami: metodami nośności granicznej lub metodą elementów skończonych (MES). W pierwszej z nich rozpatruje się cztery warunki nośności (stanu granicznego) nasypu (rys. 14):

- stateczność wewnętrzną (poślizg poziomy),
- stateczność ogólną,
- stateczność słabego podłoża,
- ogólną nośność podłoża.

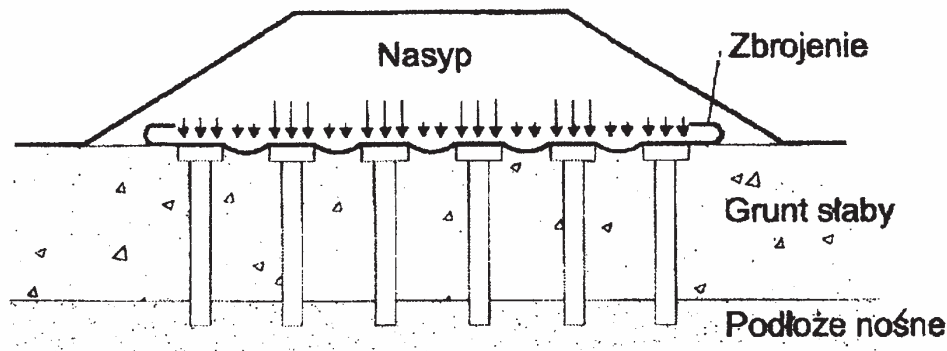
Niezależnie sprawdza się II stan graniczny - osiadania nasypu. Oblicza się je powszechnie stosowanymi metodami zgodnie z PN-81/B-03020. Zbrojenie w podstawie nasypu ogranicza poprzeczne "rozpełzanie" podłoża, co w pewnym stopniu redukuje osiadania bocznych części nasypu. Wpływu tego nie uwzględnia się zwykle w obliczeniach inżynierskich, z wyjątkiem zaawansowanych specjalistycznych analiz. Metoda elementów skończonych, w przypadku dysponowania odpowiednimi programami komputerowymi, umożliwia kompleksową analizę: osiadań i przemieszczeń poziomych gruntu, sił w zbrojeniu, zmian ciśnienia wody w porach oraz ocenę stateczności podłoża.



Rys. 14. Formy stanu granicznego nośności nasypu na słabym podłożu [68]

7.3.2. Nasypy na palach

Ostatnio wzrasta zastosowanie zbrojenia z geosyntetyków w nasypach (rys. 15) opartych na palach lub podobnych elementach nośnych (kolumnach, palach piaskowych itp.). Nasypy takie stosowane są na bardzo ściśliwym podłożu, gdy wymagania użytkowe obiektu nie pozwalają na oczekiwanie do czasu zaniku przyrostu osiadań lub w miejscach, gdzie konieczne jest ograniczenie osiadań (nasypy kolejowe na liniach o dużej szybkości ruchu, dojazdy do mostów). Wbudowanie pali w podłoże radykalnie redukuje osiadania i likwiduje duże różnice osiadań [47, 73, 78].



Rys. 15. Schemat posadowienia na palach nasypu zbrojonego geosyntetykami [73]

Nasypy posadawiane są na dwóch rodzajach elementów:

- sztywnych, zwłaszcza prefabrykowanych palach żelbetowych, palach wierconych CFA (ew. z powiększoną stożkowo głowicą), kolumnach wibrobetonowych,
- podatnych - kolumnach z kruszywa, wapienno-cemetogruntowych, palach piaskowych w koszulkach geosyntetycznych itp.

Pale rozmieszczane są zwykle w siatce kwadratowej, rzadziej w trójkątnej. Rozstaw pali zwykle nie przekracza 2 m. Skrajne rzędy pali powinny być przy podstawie skarpy nasypu. W nasypach kolejowych przyjmuje się co najmniej 3 rzędy pali pod każdy tor. Istotne znaczenie ma zachowanie wymaganego rozmieszczenia pali. Na głowicach pali układane są płyty żelbetowe lub betonuje się powiększone głowice w celu lepszego rozkładu nacisku na zbrojenie geotekstylne. Zwykle powierzchni głowic wynosi od 10% do 25% całkowitej powierzchni nasypu.

Zbrojenie geotekstylne, utrzymujące grunt pomiędzy palami, układane jest nie bezpośrednio na głowicach pali lub płytach, lecz na warstwie ochronno-wyrównawczej, zwykle ze żwiru. Stosowane są dwa rozwiązania: cienka warstwa grubości od 5 do 20 cm oraz gruba warstwa grubości od 50 cm do 1 m, lepiej rozkładająca obciążenie. W celu zapewnienia dobrej współpracy zbrojenia, przylegająca do niego część nasypu powinna być z odpowiednio dobranego materiału: żwiru, pospółki, piasku grubego lub średniego. Powinien być on mrozoodporny, nie zawierać domieszek pęczniejących, wrażliwych na rozpad i chemicznie agresywnych. Wymagane jest zagęszczenie warstw układanych pod i na zbrojeniu. Zaleca się, by powierzchnia gruntu poniżej zbrojenia wykazywała moduł $E_2 \geq 20$ MPa.

Wytrzymałość i sztywność zbrojenia geotekstylnego wyznacza się obliczeniowo. Zaleca się użycie materiału o wytrzymałości co najmniej 60 kN/m, doznającego w warunkach użytkowania wydłużenia (z uwzględnieniem pełzania) nie większego niż

3%. W przypadku dwóch warstw zbrojenia powinna je oddzielać warstwa gruntu co najmniej 15 cm.

Zbrojenie układane jest w kierunku działania największych sił tj. najczęściej w poprzek nasypu. W celu zapewnienia skutecznego dwukierunkowego działania zbrojenia stosuje się zakłady pasm co najmniej 0,5 m lub inne połączenia. Aby zapewnić zakotwienie, zbrojenie powinno sięgać co najmniej 1 m poza skrajne rzędy pali, a jego końce są zawijane, by po obu stronach nasypu powstała zamknięta poduszka.

Zbrojenie bywa też układane dwuwarstwowo - w dwóch prostopadłych kierunkach. Zaleca się wówczas układać najpierw w poprzek nasypu taśmy o szerokości nieco większej od płyt na głowicach pali, a następnie wzdłuż nasypu pełne pasma o szerokości około 5 m.

Zbrojenie powinno być ułożone poziomo, wyrównane i lekko napięte oraz przypięte do podłoża, aby zapewnić jego równomierną pracę. Niedopuszczalny jest ruch pojazdów po zbrojeniu, mogą się one poruszać dopiero po ułożeniu co najmniej 15 cm nasypu. Nasyp jest budowany warstwami po 30 do 50 cm, z kontrolowanym zagęszczaniem. Po wykonaniu całego nasypu należy odczekać na jego osiadanie, a po wyrównaniu korony układa się nawierzchnię.

Zasady projektowania zbrojenia geotekstylnego w nasypach na palach zawierają m.in. norma BS 8006:1995 oraz publikacje np. [51, 47, 73]. Na ogół przyjmuje się, że całe obciążenie jest przenoszone przez pale. W przypadku elementów podatnych można niekiedy uznać, że część obciążenia przenoszą bezpośrednio pale, zaś część przenosi podłoże pomiędzy nimi. W obliczeniach należy przeanalizować przewidywane osiadania nasypu i formowanie w nim przesklepień między podparciami na palach. Przy sprawdzaniu wytrzymałości zbrojenia należy uwzględnić wpływ uszkodzeń podczas wbudowania, pełzanie i starzenie materiału. Należy też uwzględnić siły poziome działające na pale. W niskich nasypach uwzględnia się wpływy dynamiczne od zagęszczania gruntu oraz ruchu drogowego lub kolejowego. Wpływ taboru kolejowego zanika na głębokości około 2,5 m poniżej podkładów. Zaleca się przyjmować współczynnik dynamiczny A_{dyn} równy: 1,5 na głębokości do 1,5 m oraz 1,0 na głębokości do 4 m.

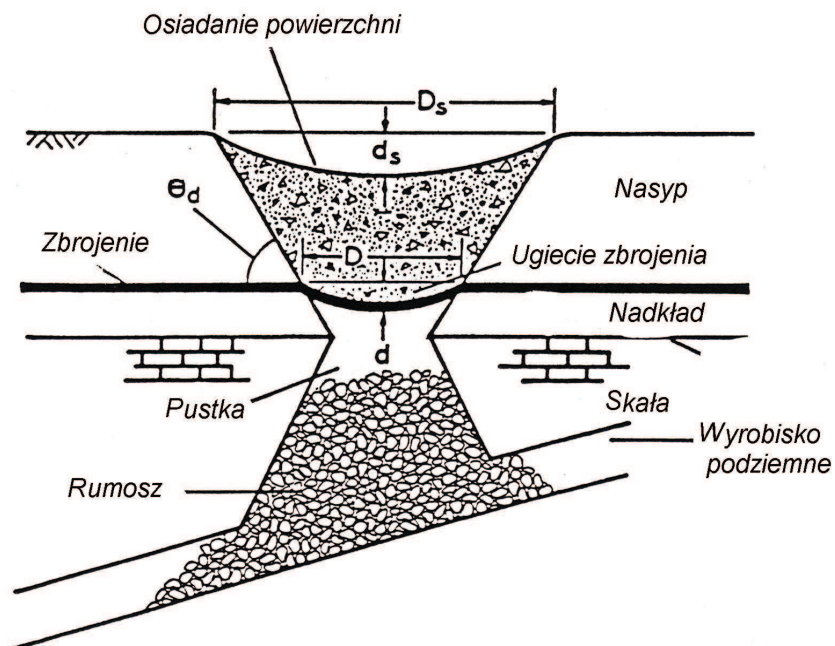
7.3.3. Nasypy na terenach zapadliskowych

Szczególnym polem zastosowania geosyntetyków jest zbrojenie obiektów na terenach narażonych na deformacje zapadliskowe (płytkiej eksploatacji górniczej, lejów sufozyjnych czy krasowych). Mogą być one szczególnie niebezpieczne na drogach (rys. 16) lub szlakach kolejowych [74]. Zbrojenie nasypów nie eliminuje deformacji, szczególnie, gdy średnica leja zapadliskowego jest duża. Celem użycia zbrojenia jest

zapobieganie nagłym nadmiernym i nieciągłym odkształceniom nasypów oraz powstawaniu zapadlisk na powierzchni.



Rys. 16. Przykład zniszczenia drogi spowodowanego zapadliskiem [59]



Rys. 17. Działanie zbrojenia z geotekstyliów w nasypie na podłożu zapadliskowym

Zbrojenie jest umieszczane najczęściej w podstawie nasypu, czasami w kilku poziomach na wysokości nasypu. Istotę działania takiego zbrojenia ilustruje rys. 17. Głębokie zapadlisko w podłożu powoduje powstanie pustki i leja przy powierzchni. Zbrojenie przekrywające lej ugina się o wartość d , a zalegający powyżej grunt osiada w postaci łagodnej czaszy o większej średnicy D_s i głębokości d_s . W osiadającym gruncie powstają przesklepienia odciażające zbrojenie. Jeżeli materiał geotekstylny nie zostanie zniszczony, to nie wystąpią bardzo niebezpieczne uskoki zapadliskowe na powierzchni drogi. Potrzebną wytrzymałość zbrojenia w podłożu nasypu oblicza się zakładając spodziewaną średnicę leja w podłożu oraz błonową pracę ugiętego zbrojenia. Jako obciążenie pionowe przyjmuje się zwykle nacisk nasypu zredukowany ze względu na powstawanie przesklepień w gruncie. Istnieją różne teorie obliczeń, uwzględniające podatność zbrojenia oraz dopuszczalne ugięcia powierzchni, np. [72].

7.4. Analiza nasypów zbrojonych metodą elementów skończonych

Metody elementów skończonych (MES) i elementów brzegowych (MEB) są zaawansowanymi środkami analizy pracy budowli ziemnych. Możliwości ich są znacznie większe, niż metod nośności granicznej. Pozwalają one modelować zachowanie się budowli, gruntu i zbrojenia z uwzględnieniem ich właściwości nieliniowych, a także oceniać osiadania i przemieszczenia poziome nasypu oraz odkształcenia zbrojenia, czego nie umożliwiają programy obliczające stany graniczne. Potrzebne są jednak specjalistyczne programy, dostosowane do analizy ośrodka gruntowego. Szczególnie ważne jest, by w programie były dostępne specjalne elementy liniowe (do zbrojenia) oraz kontaktowe, służące do modelowania styku zbrojenia z ośrodkiem gruntowym. Programy MES lub MEB stosowane w statyce budowli, ograniczone do analizy liniowo-sprężystej, są nieprzydatne.

Metody MES i MEB stosowane są w przypadkach, gdy uzasadniony jest duży nakład pracy na przygotowanie danych i wykonanie obliczeń, a później ich analizę. Używa się je głównie w specjalnych analizach do celów naukowych lub obiektów o szczególnym znaczeniu np. zapór. Jednak dostępność przyjaznych użytkownikowi programów sprawia, że coraz częściej stają się one narzędziem projektanta. Zastosowanie tych metod do nasypów zbrojonych na słabym podłożu omawiają liczne publikacje np. [68]. Jednak duża dokładność wyników obliczeń tymi metodami jest pozorna, gdyż zależy ona istotnie od poprawności wyjściowych parametrów geotechnicznych, zwłaszcza słabego gruntu. Parametry te, a także ich zmiany w czasie pod obciążeniem nasypem, są trudne do ustalenia.

8. Zastosowania geosyntetyków do drenaży i warstw filtracyjnych

Głównymi funkcjami geotekstyliów i wyrobów pokrewnych, stosowanych w systemach drenażowych są: filtrowanie, rozdzielanie i drenaż.

W systemach drenarskich geotekstylia pełnią rolę filtru. W zastosowaniach geotechnicznych filtr geotekstylny pełni dwie zasadnicze funkcje: pozwala przeniknąć wodzie i zatrzymuje (powstrzymuje) grunt, nie cząstki gruntu. Filtr powinien umożliwiać przenikanie drobnych cząstek niesionych przez wodę. Gdyby drobne cząstki nie mogły przedostać się przez filtr, nastąpiłaby jego kolmatacja.

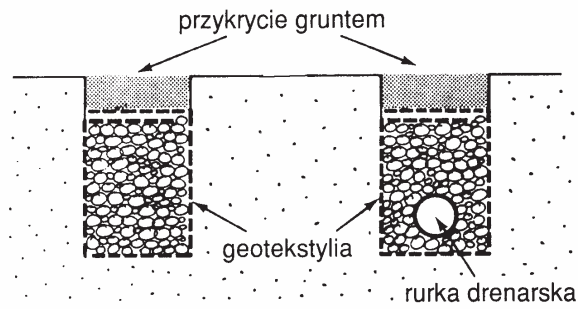
Przy projektowaniu filtrów pod uwagę brane są dwa kryteria: przepuszczalność i zdolność zatrzymywania. Te dwa kryteria są przeciwstawne, ale nie sprzeczne. Materiał geotekstylny powinien mieć charakterystyczny wymiar porów wystarczająco mały, aby zatrzymać grunt i wystarczająco duży, aby umożliwić swobodny przepływ wody, a także przejście przez filtr najdrobniejszym cząstkom gruntu niesionym przez wodę [33].

W normie europejskiej EN 13252:2000 wyszczególniono właściwości geotekstyliów i wyrobów pokrewnych, wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych w systemach drenażowych, oraz odpowiednie metody badań w celu określenia tych właściwości. Dla materiałów geotekstylnych pełniących funkcje drenażowe istotnym parametrem, poza podanymi w tablicy (tablica 5), jest zdolność przepływu wody w płaszczyźnie wyrobu, wyznaczana zgodnie z normą PN-EN ISO 12958:2002.

8.1. Odwodnienia

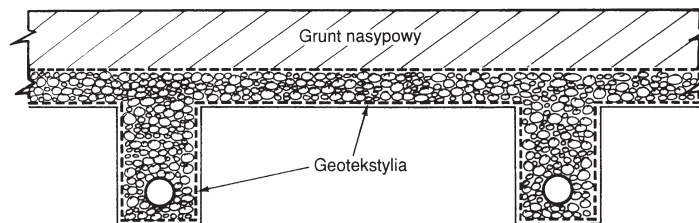
W odwodnieniu geotekstylia są używane jako „filtr” pomiędzy zalegającym gruntem a materiałem odprowadzającym wodę. Niektóre geosyntetyki (np. geokompozyty drenażowe) pełnią funkcje drenażowe. Wśród zastosowań można wyróżnić m.in:

- drenaż poziomy (w inżynierii komunikacyjnej często nazywany podłużnym), w którym geotekstylia otaczają łatwoprzepuszczalną zasypkę ziarnistą wypełniającą wykopany rów (rys. 18),



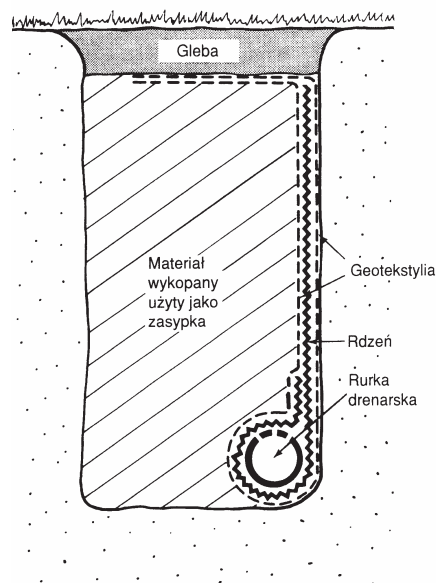
Rys. 18 Drenaż poziomy [29]

- drenaż powierzchniowy (warstwowy) (rys. 19),



Rys. 19. Warstwa drenująca [29]

- dren żebrowy (rys. 20), układ złożony z filtru geotekstynlnego i rdzenia (siatkowego, folii z wytłoczeniami itp.), przewodzącego wodę.



Rys. 20. Dren żebrowy [29]

8.2. Materiały geotekstylne używane w systemach drenażowych jako filtry

Jednym z pierwszych czynników do oceny materiału geotekstylnego jako filtru jest struktura materiału, szczególnie jej wpływ na wielkość i rozkład porów w materiale. Pod tym względem geotekstylię można podzielić na trzy kategorie:

- włókniny cienkie (ang. thin non-woven),
- włókniny grube (ang. thick non-woven),
- tkaniny (ang. woven).

Włókniny cienkie są materiałami o grubości mniejszej od 1 mm. Są one zwykle zbudowane z cienkiej ciągłej przędzy, która jest początkowo układana, tworząc luźną sieć. Następnie sieć ta jest albo zginiata wałcami na gorąco, co powoduje zgrzewanie się przędzy w miejscach kontaktu, albo jest przesywana przez zespół haczykowatych igieł. Igłowanie powoduje mechaniczne splątanie włókien, nadające im rodzaj zespolenia. W wyniku losowego rozmieszczenia punktów styku otwory porów mają bardziej zróżnicowane rozmiary, niż w przypadku tkaniny.

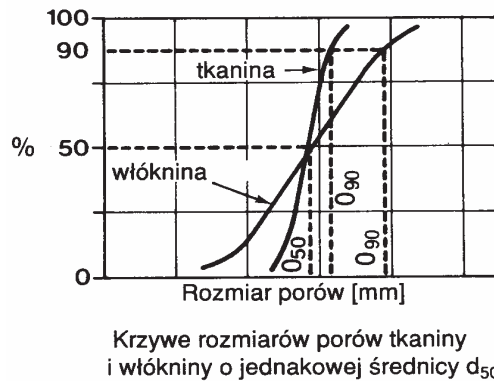
Włókniny grube są to zwykle filce, złożone z ciętych włókien. Są one początkowo układane jako luźne runo, a następnie igłowane. Często wyrób jest wykańczany na walcach w celu nadania mu stosunkowo gładkiej powierzchni. Dzięki swojej grubości geowłókniny te mogą być traktowane jako filtry trójwymiarowe. Podobnie jak w przypadku geowłóknin cienkich, wymiary ich porów mogą się zmieniać w szerokim zakresie.

Geotekstylię tkane zawierają dwa składniki: osnowę biegnącą wzdłuż i wątek biegnący w poprzek materiału. Materiały tkane typowymi technikami mają strukturę ortogonalną, ze stosunkowo regularnymi otworami, rozłożonymi równomiernie na powierzchni materiału. Składniki materiału to zwykle płaskie tasiemki, przędza z tasiemek lub przędza ciągła o przekroju okrągłym.

Jeżeli splot nie jest kwadratowy, to otwory tkaniny są prostokątne. Wtedy jako wielkość porów traktuje się ich mniejszy wymiar.

Charakterystyczny wymiar porów geotekstyliów O_{90} wyznacza się zgodnie z normą PN-EN ISO 12956.

Rozkład rozmiarów porów geotekstyliów wyznacza się metodą przesiewania. Na podstawie wyników badań można skonstruować krzywą rozkładu rozmiarów porów materiału. Wymiary oczek siatki lub porów geotekstyliów tkanych są relatywnie równomierne, podczas gdy we włókninach zmieniają się w szerszym zakresie. Przedstawiono to na rys. 21. W praktyce największy rozmiar porów włókniny odpowiada wartości O_{98} , lecz jako decydujący o zachowaniu się uznawany jest wymiar porów O_{95} [29]. Jednakże niektóre zasady filtracji przyjmują za podstawę rozmiary porów O_{50} lub O_{90} .



Rys. 21. Krzywe rozmiarów porów tkaniny i włókniny o jednakowej średnicy d_{50} [29]

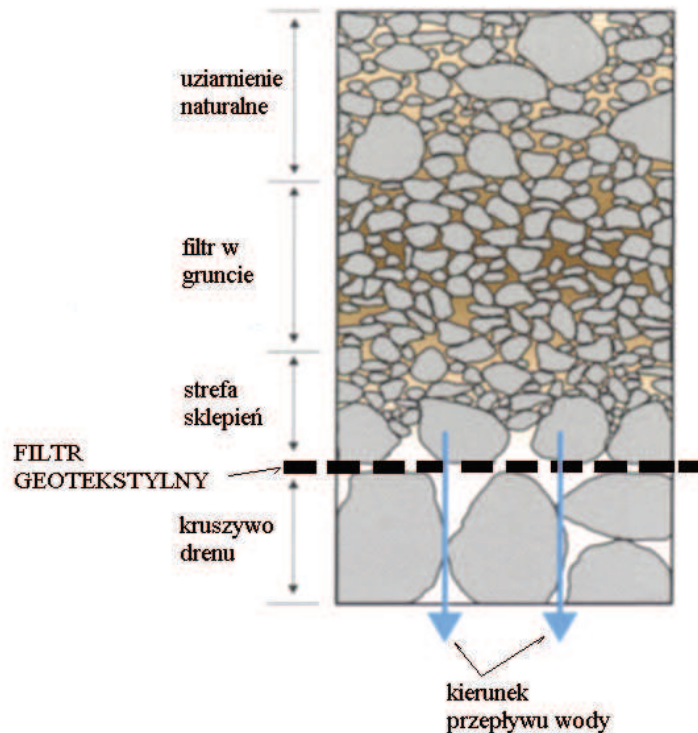
8.3. Mechanizm działania filtru geotekstylnego

Kryteria filtrów geotekstylnych zależą od warunków przepływu. W typowych zastosowaniach do drenażu mamy do czynienia z ustalonym jednokierunkowym przepływem laminarnym.

Podczas przepływu wody przez układ grunt-materiał geotekstylny grubsze ziarna gruntu wytwarzają sklepienia ponad otworami materiału geotekstylnego. Pozwala to, by drobniejsze cząstki przylegające do materiału przepłynęły przez pory materiału geotekstylnego i zostały wypłukane przez płynącą wodę. Jeżeli nie występuje sufozja gruntu, tj. migracja bardzo drobnych cząstek gruntu przez pory szkieletu gruntowego, układ stabilizuje się bardzo szybko i nie ma zmian struktury gruntu oddalonego od filtru. Nad powierzchnią materiału geotekstylnego tworzy się tzw. filtr odwrotny przedstawiony na rys. 22.

Często można zaobserwować redukcję prędkości przepływu podczas początkowego powstawania sieci sklepień. Jest to spowodowane blokowaniem porów materiału geotekstylnego przez większe ziarna gruntu. Blokowanie nie oznacza zatkania, lecz jedynie częściowe zakrycie otworów [29].

Zarówno tkaniny, jak i włókniny wykazują pewien spadek przepuszczalności poprzecznej systemu, aż do wytworzenia się stanu stabilnego. Warunki stanu stabilnego zostaną osiągnięte tylko wtedy, gdy geotekstylia są prawidłowo zaprojektowane, tzn. odpowiednio do układu. Powinny być dobrane tak, aby przepływ hydrauliczny był ustalony, co umożliwi powstanie sieci sklepień oraz, jeśli to możliwe, strefy filtru w gruncie.



Rys. 22. Zasada działania filtra geotekstylnego. Od góry: uziarnienie naturalne; filtr w gruncie; strefa sklepień; materiał geotekstylny; kruszywo drenu [76]

8.4. Funkcje filtrów geotekstylnych

Aby skutecznie spełniać rolę filtra, materiał geotekstylny powinien zapobiegać erozji wewnętrznej gruntu. Jednocześnie rozmiary porów nie mogą być zbyt małe, by nie ulegały kolmatacji i nie malała ich przepuszczalność. Geotekstylnia powinny zatem:

- zapobiegać erozji wewnętrznej chronionego gruntu,
- zachować przepuszczalność układu.

8.5. Wymagania hydrauliczne dla filtrów geotekstylnych

Materiały geotekstylne stosowane jako osłony filtrujące w układach drenażowych powinny mieć dostateczną wodoprzepuszczalność. Aby właściwie spełniały swoje zadanie, powinny umożliwić przepływ wody bez jej podpiętrzania (np. ZUAT [87]), a także bez wypłukiwania gruntu podłoża.

Współczynnik wodoprzepuszczalności prostopadłej do materiału k_v powinien być ogólnie co najmniej 10 do 50-krotnie większy od współczynnika filtracji

odwadnianego gruntu i wynosić $k_v \geq 10^{-4}$ m/s przy nacisku prostopadłym 2 kPa. W celu zapewnienia długotrwałej przepuszczalności zalecana jest [SN 640 552a:1997, 53] wartość k_v co najmniej 100 razy większa, uwzględniając wpływ ściśnięcia włókniny przez nacisk gruntu oraz zatykanie porów, zwłaszcza w warunkach działania obciążeń dynamicznych). Aby geosyntetyki mogły prawidłowo pełnić funkcję drenażu zaleca się współczynnik wodoprzepuszczalności w płaszczyźnie materiału $k_H \geq 10^{-3}$ m/s przy nacisku 2 kPa.

Wpływ obciążenia, jakiemu poddawany jest materiał geotekstylny, powinien być uwzględniany w przypadku geowłóknin, gdyż ich ściśnięcie powoduje zmniejszenie wymiarów porów i wodoprzepuszczalności. Wpływ ten powinien być uwzględniony również w przypadku geokompozytów z rdzeniem, którego grubość maleje pod wpływem obciążenia, gdyż pole przekroju, przez które płynie woda będzie zmniejszać wraz ze wzrostem obciążenia, a także na skutek pełzania tych materiałów pod obciążeniem długotrwałym.

8.6. Wymagania dotyczące doboru filtrów

Kryteria doboru materiałów filtrujących obejmują sprawdzenie:

- działania mechanicznego filtra (zatrzymywania cząstek),
- odporności na kolmatację (zatykanie porów materiału),
- działania hydraulicznego filtra (wystarczający przepływ).

Zgodnie z przepisami [53] należy rozróżniać:

- grunty drobnoziarniste $d_{40} < 0,06$ mm,
- grunty grubo i różnoziarniste $d_{40} > 0,06$ mm.

Ponadto wyróżnia się grunty trudne do spełnienia wymagań filtrowania:

- drobnoziarniste - wskaźnik plastyczności $I_p < 0,15$ i/lub stosunek zawartości frakcji ilowej do pyłowej $< 0,5$,
- grunty grubo- i różnoziarniste, zawierające frakcję pyłową ($d < 0,06$ mm):
 - wskaźnik jednorodności uziarnienia $C_U = U = d_{60}/d_{10} < 15$ i/lub
 - zawartość frakcji od 0,02 do 0,1 mm $> 50\%$.

Zalecane są następujące wartości kryteriów:

- zatrzymywania cząstek filtrowanego gruntu
 - grunty drobnoziarniste $O_{90 \text{ gtx}} \leq 10 d_{50}$,
 - grunty trudne $O_{90 \text{ gtx}} \leq d_{90}$,
 - grunty grubo- i różnoziarniste $O_{90 \text{ gtx}} \leq 5 d_{50} \sqrt{U}$ oraz $O_{90 \text{ gtx}} \leq d_{50}$;
- kolmatacji - dla wybranego wyrobu $O_{90 \text{ wyb}} > (0,2 \div 1) O_{90 \text{ gtx}}$,

- działania hydraulicznego - materiał geotekstylny drenu powinien zapewnić wystarczający przepływ wody w danym podłożu.

W zależnościach tych oznaczono:

- $O_{90\text{ gtx}}$ - charakterystyczna wielkość porów geotekstyliów,
- d_{10}, d_{50}, d_{90} - wielkość ziaren gruntu, które wraz z mniejszymi stanowią odpowiednio 10, 50 i 90 % masy gruntu.

Kryteria dotyczące filtrowania gruntów niespoistych i mało spoistych wg [62]:

- dla geotkanin tasiemkowych (o równomiernym wymiarze otworów)
$$O_{90\text{ gtx}} / d_{90} \leq 2,5$$
- dla geowłóknin igłowanych (o zróżnicowanych wymiarach porów, zamykających się pod obciążeniem)

$$O_{90\text{ gtx}} / d_{90} \leq 5.$$

Jest istotne, by stosunki wymiarów porów były jak najbliższe podanym wartościom granicznym 2,5 i 5, aby zapewnić jak największą przepuszczalność geotekstyliów, zachowując zarazem ich zdolność do zatrzymywania cząstek gruntu.

W gruntach spoistych stosunek $O_{90\text{ gtx}} / d_{90}$ może być znacznie większy, jednak trudno podać konkretne wartości ze względu na bardzo małe i zróżnicowane wymiary cząstek ilastych gruntu.

8.7. Drenaż francuski

Dren francuski (rys. 23) składa się z sącza wykonanego z materiału mineralnego – kruszywa, tłucznia itp., otoczonego materiałem geotekstylnym. Materiał geotekstylny pełni rolę filtru zapobiegającego migracji drobnych cząstek gruntu do wnętrza drenu, a tym samym zapobiega jego zamuleniu. Wodoprzepuszczalność materiału geotekstynego powinna pozwolić na swobodny przepływ wody odprowadzanej z otaczającego gruntu do wnętrza filtru. Pole przekroju poprzecznego drenu wyznacza się w zależności od ilości wody, jaką należy odprowadzić oraz uziarnienia materiału mineralnego wypełniającego dren.

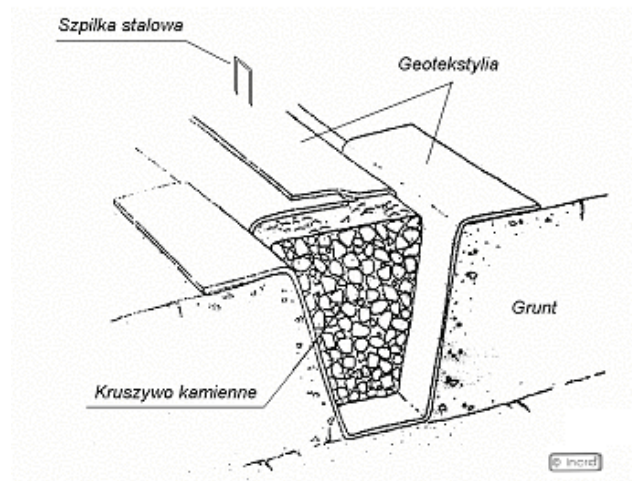
Kruszywo wypełniające dren francuski powinno [80]:

- charakteryzować się wystarczająco dużą wodoprzepuszczalnością do odprowadzenia wody napływającej z gruntu,
- nie łusować się pod wpływem wody dopływającej do drenu.

Właściwie zaprojektowany i właściwie wykonany dren francuski ma wiele zalet. Są to między innymi:

- przedłużenie bezawaryjnego okresu pracy drenu,

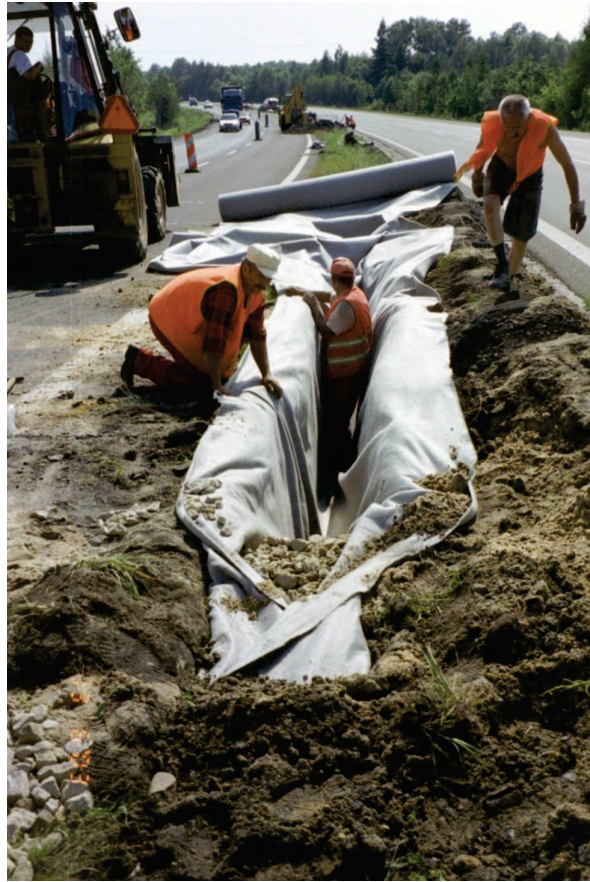
- mniejsze koszty wykonania i eksploatacji,
- możliwość zagospodarowania „powierzchni nad drenem” – np. na wykonanie chodnika.



Rys. 23. Schemat drenu francuskiego [25]

Etapy wykonania drenu francuskiego:

1. wykonanie wykopu wąskoprzestrzennego,
2. wyłożenie powierzchni wykopu materiałem geotekstylnym (pasem biegnącym wzdłuż wykopu lub ciętymi pasami układanymi w poprzek wykopu),
3. wypełnienie przestrzeni drenu kruszywem,
4. zamknięcie drenu i połączenie brzegów materiału geotekstelnego,
5. nałożenie na zamknięty dren 3-5 cm (lub większej) warstwy gruntu.

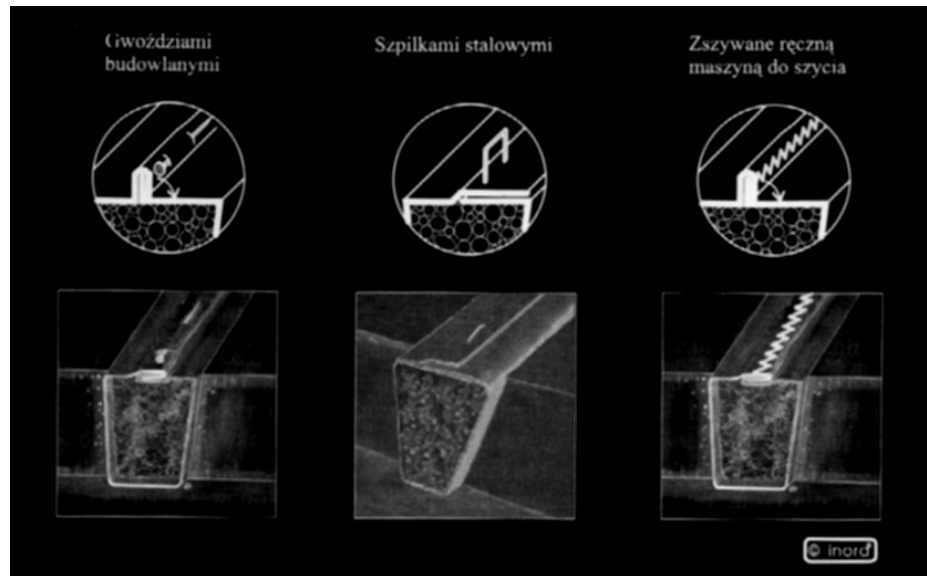


Rys. 24. Wykonywanie drenu francuskiego w pasie rozdziału

Na rys. 24 pokazano dren francuski podczas jego wykonywania.

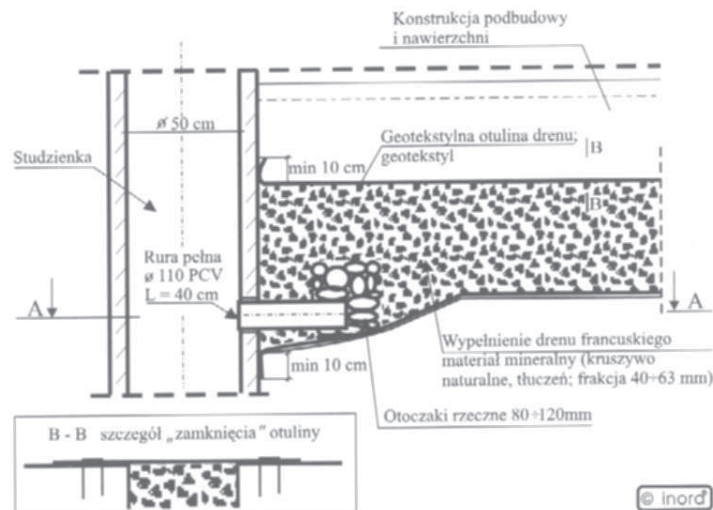
Charakterystyczny wymiar porów materiału geotekstylnego stosowanego w konstrukcji drenu francuskiego powinien umożliwić swobodny przepływ wody do wnętrza drenu i zapewnić zatrzymanie gruntu otaczającego dren. Minimalna szerokość zakładu geotekstyliów układanych w wykopie wynosi 30 cm [80]. Kierunek zakładów powinien być zgodny z kierunkiem przepływu wody wewnątrz drenu – układanie zaczyna się w punkcie najniższym i prowadzi ku wzniesieniu.

Kruszywo wypełniające dren francuski należy zagęścić (warstwami). Po zagęszczeniu ostatniej warstwy powierzchnię drenu zamyka się. Warstwy materiału geotekstylnego należy połączyć ze sobą, np. za pomocą szpilek stalowych w kształcie litery U. Przykłady zamknięć drenu pokazano na rys. 25.



Rys. 25. Przykładowe sposoby zamykania drenu francuskiego [25]

Odprowadzenie wody z drenu francuskiego należy wykonać rurami pełnymi z tworzywa sztucznego. Rury te przylączy się do studzienek kanalizacji deszczowo-burzowej (rys. 26).



Rys. 26. Przekrój podłużny połączenia drenu francuskiego ze studnią kanalizacyjną [25]

Przykładowe przepustowości drenów francuskich zawierają m.in. opracowania [25, 76].

9. Wbudowanie geosyntetyków w budowlę ziemne

9.1. Transport i składowanie

Geosyntetyki powinny być dostarczane w rolkach nawiniętych na tuleje (lub w panelach). Wymiary (szerokość, długość) mogą być standardowe lub dostosowane do indywidualnych zamówień. Rolki powinny być opakowane w wodoszczelną folię, stabilizowaną przeciw działaniu promieniowania UV i zabezpieczone przed rozwinieniem. Na opakowaniu geosyntetyków powinna być umieszczona etykieta zawierająca: nazwę i adres producenta, oznaczenie rodzaju i odmiany wyrobu, datę produkcji, numer rolki, wymiary w rolce (szerokość i długość), masę rolki, masę powierzchniową wyrobu, numer normy lub Aprobata Technicznej IBDiM.

Warunki składowania nie powinny wpływać na właściwości geosyntetyków. Podczas transportu i przechowywania należy chronić materiały, zwłaszcza geowłókniny przed zawilgoceniem, zabrudzeniem, jak również przed długotrwałym (np. parotygodniowym) działaniem promieni słonecznych. Materiały należy przechowywać i transportować wyłącznie w rolkach opakowanych fabrycznie. Rolki powinny być układane zgodnie z zaleceniami producenta. Nie należy układać na nich żadnych obciążeń. Opakowania nie należy zdejmować aż do momentu wbudowania.

Podczas ładowania, rozładowywania i składowania należy zabezpieczyć rolki przed uszkodzeniami mechanicznymi lub chemicznymi oraz przed działaniem wysokich temperatur.

9.2. Przygotowanie podłoża

Podłoże powinno być przygotowane przez:

- usunięcie drzew, krzewów, korzeni, większych kamieni, które mogłyby uszkodzić materiał, a także z ziemi roślinnej, o ile jest to możliwe (np. na torfach nie jest wskazane usuwanie tzw. kożucha),
- wyrównanie, najlepiej spycharką na podwoziu gąsienicowym, aby układany materiał przylegał na całej powierzchni do podłoża.

9.3. Układanie i zasypywanie geosyntetyków

Geosyntetyki należy układać na podstawie planu, określającego wymiary pasm, kierunek postępu robót, kolejność układania pasm, szerokość zakładów, sposób łączenia, mocowania tymczasowego itp. Wskazany jest kierunek układania "pod

górze”. Należy gromadzić i przechowywać etykiety z rolek. W obiektach 3. kategorii geotechnicznej sporządza się dokładne plany powykonawcze wbudowania wyrobów.

Warstwy rozdzielcze, filtrujące i osłony należy tak układać, by pasma leżały poprzecznie do kierunku zasypywania. Zakłady sąsiednich pasm powinny wynosić 30 – 50 cm, na podłożu bardzo słabym ($\text{CBR} \leq 2\%$) i nierównym lub w bieżącej wodzie – nawet 100 cm. Jeżeli pokrywana powierzchnia jest węższa niż dwie szerokości pasma, to można je układać wzdłuż osi. Należy wówczas szczególnie przestrzegać zachowania zakładu pasm. Aby zapobiec przemieszczaniu np. przez wiatr, pasma należy przymocować (np. wbitymi w grunt prętami w kształcie U) lub chwilowo obciążyć (np. pryzmami gruntu, workami z gruntem, starymi oponami itp.).

W uzasadnionych przypadkach, szczególnie zbrojenia geotekstylnego, wymagane jest łączenie pasm, najczęściej na budowie za pomocą zszywania, czasem też zgrzewania, klejenia, taśmami samoprzylepnymi itp. W takim przypadku wielkość zakładu określa się na podstawie indywidualnych wymagań i prób.

Wskazane jest stosowanie pasm jak najszerszych (około 5 m), gdyż mniej jest zakładów i połączeń. W przypadku dysponowania wąskimi pasmami (1,5 – 3 m) korzystny jest układ krzyżowy z przeplecionych prostopadłych pasm, rozwijanych poprzecznie i podłużnie. Układ taki zapewnia skuteczną dwukierunkową współpracę materiału.

Jeżeli szerokość wyrobu nie jest dostosowana do wymiarów konstrukcji, to rolki materiału można ciąć na potrzebny wymiar za pomocą odpowiednich urządzeń, np. piły mechanicznej. Nie należy przy tym dopuszczać do miejscowego topienia materiału, aby nie spowodować sklejanía warstw rolki.

Zasypywanie powinno następować od czoła pasma na ułożony materiał, po czym zasypka jest rozkładana na całej powierzchni odpowiednim urządzeniem, najczęściej spycharką, a tylko wyjątkowo ręcznie. Duże kamienie nie powinny być zrzucane z większej wysokości, by nie niszczyć geosyntetyków. W takim przypadku celowe jest układanie najpierw bezpośrednio na materiale warstwy gruntu bez kamieni. Pasma należy układać „dachówkowo”, aby przesuwanie zasypki nie powodowało podrywania materiału.

Niedopuszczalny jest ruch pojazdów gąsienicowych, walców okołkowanych i innych ciężkich maszyn bezpośrednio po ułożonym materiale geotekstylnym. Wymagana jest warstwa zasypki co najmniej 25 – 30 cm. Jednak spotyka się także pogląd, że w przypadku warstw filtrujących i separacyjnych ruch ciężkich pojazdów kołowych po materiale jest dopuszczalny, gdyż powstanie kolein powoduje wybranie luzów i napięcie materiału, dzięki czemu lepiej przeciwdziała on odkształceniom gruntu. Koleiny zostają następnie wypełnione zasypką.

Wbudowanie zbrojenia geotekstylnego powinno być wyjątkowo staranne. Materiał powinien być wyrównany i możliwie lekko napięty. Zasypkę należy układać ostrożnie

i zagęszczać odpowiednim urządzeniem. Dużych ostrych kamieni nie należy zrzucić bezpośrednio na geosyntetyki, aby nie powodowały one przebicia lub uszkodzeń materiału.

W przypadku budowli trwałych (użytkowanych przez ponad 5 lat) zaleca się wbudowanie dodatkowych elementów zbrojenia geotekstylnego („świadków”), które mogą być później wykopane i poddane badaniu np. co 5 – 10 lat w celu monitorowania starzenia wyrobu i oceny stanu bezpieczeństwa budowli.

10. Badania kontrolne i kryteria odbioru

Materiały geotekstylne powinny zostać sprawdzone przed wbudowaniem (zgodność ze specyfikacjami, parametry techniczne).

Inwestor lub zamawiający wyrób geosyntetyczny może zlecić badania kontrolne zgodności wyrobu z wymaganiami (dokumentem certyfikacyjnym lub specyfikacją). Rodzaje i zakres badań powinny być dostosowane do konkretnego zastosowania. Liczba próbek zależy od powierzchni wbudowywanego wyrobu: orientacyjnie przy powierzchni ponad 10 000 m² zaleca się zbadać jeden komplet próbek na każde 10 000 m² [13].

Podczas wbudowywania należy sprawdzać:

- oczyszczenie i wyrównanie terenu,
- zgodność z projektem i stan materiału,
- prawidłowość ułożenia, przyleganie do gruntu, wymiary, wielkość zakładu itp.,
- zabezpieczenie przed przemieszczeniem, prawidłowość połączeń, zakotwienia i balastu,
- przestrzeganie ograniczeń ruchu roboczego pojazdów.

11. Piśmiennictwo

a. Normy polskie

- PN-B-02479:1998 Geotechnika - Dokumentowanie geotechniczne.
- PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-B-02481:1998 Geotechnika - Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.
- PN-83/B-03010 Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu
- PN-B-06050:1999 Geotechnika - Roboty ziemne - Wymagania ogólne
- PN-87/S-02201 Drogi samochodowe. Nawierzchnie drogowe. Podział, nazwy i określenia.
- PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe - Roboty ziemne - Wymagania i badania.
-
- PN-EN 918:1999 Geotekstyli i wyroby pokrewne - Wyznaczanie wytrzymałości na dynamiczne przebicie (metoda spadającego stożka)
- PN-EN 963:1999 Geotekstyli i wyroby pokrewne - Pobieranie próbek laboratoryjnych i przygotowanie próbek do badań
- PN-EN 964-1:1999 Geotekstyli i wyroby pokrewne - Wyznaczanie grubości przy określonych naciskach - Warstwy pojedyncze
- PN-EN 965:1999 Geotekstyli i wyroby pokrewne - Wyznaczanie masy powierzchniowej
- PN-EN 1897:2002 (U) Geotekstyli i wyroby pokrewne - Wyznaczanie właściwości pełzania przy ściskaniu
- PN-EN 12224:2002 Geotekstyli i wyroby pokrewne - Wyznaczanie odporności na warunki klimatyczne
- PN-EN 12225:2002 Geotekstyli i wyroby pokrewne - Metoda wyznaczania odporności mikrobiologicznej przez umieszczenie w gruncie
- PN-EN 12226:2002 Geotekstyli i wyroby pokrewne - Badania ogólne do oceny trwałości
- PN-EN 12447:2002 (U) Geotekstyli i wyroby pokrewne - Selekcyjna metoda badania odporności na hydrolizę w wodzie
- PN-EN 13249:2002 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)

Geosyntetyki - geokraty, geowłókniny, geotkaniny, geokompozyty, geosiatki

- PN-EN 13250:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych do budowy dróg kolejowych
- PN-EN 13251:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych w robotach ziemnych, fundamentowaniu i konstrukcjach oporowych
- PN-EN 13252:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych w systemach drenażowych
- PN-EN 13253:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych w zabezpieczeniach przeciwoerozyjnych (ochrona i umocnienia brzegów)
- PN-EN 13254:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych do budowy zbiorników wodnych i zapór
- PN-EN 13255:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych do budowy kanałów
- PN-EN 13256:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych do budowy tuneli i konstrukcji podziemnych
- PN-EN 13257:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych do budowy składowisk odpadów stałych
- PN-EN 13265:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych do budowy zbiorników odpadów ciekłych
- PN-EN 13562:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Wyznaczanie oporu na przenikanie wody - Metoda ciśnienia hydrostatycznego
- PN-EN 14030:2002 (U) Geotekstylia i wyroby pokrewne - Selekcyjna metoda wyznaczania odporności na roztwory kwasów i zasad
- PN-EN ISO 9863-2:1999 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Wyznaczanie grubości przy określonych naciskach - Określenie grubości warstwy pojedynczej wyrobów wielowarstwowych
- PN-EN ISO 10320:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Identyfikacja w miejscu zastosowania
- PN-EN ISO 11058:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Wyznaczanie wodoprzepuszczalności w kierunku prostopadłym do powierzchni wyrobu, bez obciążenia
- PN-EN ISO 12236:1998 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Badanie na przebiecie statyczne (metoda CBR)
- PN-EN ISO 12956:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Wyznaczanie charakterystycznej wielkości porów
- PN-EN ISO 12958:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Wyznaczanie zdolności przepływu wody w płaszczyźnie wyrobu

- PN-EN ISO 13427:2000 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Symulacja uszkodzeń na skutek ścierania (metoda przesuwnego bloku)
- PN-EN ISO 13431:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Wyznaczanie pełzania podczas rozciągania i zniszczenia przy pełzaniu
- PN-EN ISO 13437:2000 Geotekstylia i wyroby pokrewne - Metoda instalowania i pobierania próbek z gruntu oraz badania próbek w laboratorium
- PN-ISO 9862:1994 Geotekstylia - Pobieranie próbek laboratoryjnych i przygotowywanie próbek do badań
- PN-ISO 9863:1994 Geotekstylia - Wyznaczanie grubości przy określonych naciskach
- PN-ISO 9864:1994 Geotekstylia - Wyznaczanie masy powierzchniowej
- PN-ISO 10318:1993 Geotekstylia - Terminologia
- PN-ISO 10319:1996 Geotekstylia - Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek
- PN-ISO 10319:1996/Ap1:1998 Geotekstylia - Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek
- PN-ISO 10321:1996 Geotekstylia - Badanie wytrzymałości na rozciąganie połączeń/szwów metodą szerokich próbek
- PN-ISO 10321:1996/Ap1:1998 Geotekstylia - Badanie wytrzymałości na rozciąganie połączeń/szwów metodą szerokich próbek

b. Normy zagraniczne

BS 6906 Geotextiles - Methods of test:

Part 2: Determination of apparent pore size distribution by dry sieving (Określenie umownego wymiaru porów metodą przesiewania na sucho)

Part 3: Determination of waterflow normal to the plane of the geotextile under a constant head (Określenie przepływu wody prostopadłego do płaszczyzny geotekstyliów pod stałym ciśnieniem)

BS 5930:1981 Code of practice for site investigations.

BS 8006:1995 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills (Norma stosowania wzmocnionych/zbrojonych gruntów i innych nasypów)

E DIN 60500 Teil 4:1997 Geotextilien und Geotextilienverwandte Produkte - Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Geotextilien senkrecht zu ihrer Ebene unter Auflast bei konstantem hydraulischen Höheunterschied (Geotekstylia i produkty pokrewne - Określanie wodoprzepuszczalności geotekstyliów prostopadłej do ich płaszczyzny pod określonym obciążeniem przy stałym spadku hydraulicznym - Projekt)

- prEN 1997-1 (2003) Eurocode-7: Geotechnical design - Part 1: General rules (Draft)
- prEN-1997-2 (2003) Eurocode-7: Geotechnical design - Part 2: Geotechnical investigation and testing (Draft)
- ENV 12447 Geotextiles and geotextile-related products – Screening test method for determining the resistance to hydrolysis
- prEN ISO 12957-1:1997 Geotextiles and geotextile-related products – Determination of friction characteristics – Part 1: Direct shear method (ISO/DIS 12957-1:1997)
- prEN ISO 12957-2:1997 Geotextiles and geotextile-related products – Determination of friction characteristics – Part 2: Inclined plane method (ISO/DIS 12957-2:1997)
- ENV ISO 13438 Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to oxidation (ISO/TR 13438:1999)
- prEN 14475 (2000) Execution of special geotechnical works - Reinforced fill (Draft)
(Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych - Nasypy zbrojone - Projekt)
- SN 640 552a:1997 Geotextilien - Anforderungen für die Funktionen Trennen, Filtern, Drainieren (Geotekstylija - Wymagania dotyczące funkcji rozdzielania, filtracji i drenażu)

c. Przepisy prawne

- 1 Ustawa z dnia 21.03.1985 r. o drogach publicznych. Dziennik Ustaw Nr 71, poz. 838. Tekst jednolity z 29.08.2000 r.
- 2 Prawo budowlane. Ustawa z dnia 7.07.1994 r. Dziennik Ustaw Nr 89, poz. 414. z późniejszymi zmianami (Tekst jednolity z 10.11.2000 r. Dziennik Ustaw Nr 106, poz. 1126, nr 129 z 2001 poz. 1439, nr 80 z 2003 poz. 718).
- 3 Zarządzenie Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa z dnia 30 grudnia 1994 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego. Monitor Polski nr 2/1995, poz. 30.
- 4 Rozporządzenie z 5 sierpnia 1998 w sprawie aprobat i kryteriów technicznych oraz jednostkowego stosowania wyrobów budowlanych. Dz. U. Nr 107, poz. 679.
- 5 Rozporządzenia Ministra Rozwoju Regionalnego i Mieszkalnictwa z dnia 3 kwietnia 2001 r. w sprawie wprowadzenia obowiązku stosowania niektórych Polskich Norm dla budownictwa. Dz. U. Nr 38/2001, poz. 456.
- 6 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 2.03.1999 w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dziennik Ustaw Nr 43 poz. 430.

- 7 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 30.05.2000 w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. Dziennik Ustaw Nr 63 poz. 735.
- 8 Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 24.09.1998 w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych. Dziennik Ustaw Nr 126 poz. 839.
- 9 Wytyczne techniczno-budowlane projektowania i wykonywania obiektów mostowych na terenach eksploatacji górniczej. Ministerstwo Komunikacji, Warszawa 1977.

d. Instrukcje i wytyczne Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych:

- 10 Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. Warszawa 1998.
- 11 Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Warszawa 1997.
- 12 Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych (KWRNPP 2001). Warszawa 2001.
- 13 Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym, Warszawa 2002

e. Publikacje

- 14 Ajdukiewicz J. (2003): Strome nasypy drogowe zbrojone geosyntetykami... XIII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gliwice-Szczyrk, s. 371-386.
- 15 Ashby M.F., Jones D.R.H. (1996): Materiały inżynierskie t. 2, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa
- 16 Bolt A., Duszyńska A. (1998): Kryteria doboru geosyntetyków jako warstw separacyjnych i filtracyjnych. "Inżynieria Morska i Geotechnika" nr 1, s. 25-31.
- 17 Bugajski M., Grabowski W. (1999): Geosyntetyki w budownictwie drogowym. Wyd. Politechniki Poznańskiej, 137 s.
- 18 Calhoun C.C. 1972: „Development of Design Criteria and Acceptance Specifications for Plastic Filter Cloth”. Tech. Dept., No S-72-7 US Army Engineer, Waterways Expt. Station, Vicksburg Mass.
- 19 Chodyński A. (1995): Normalizacja i certyfikacja geotekstyliów w Polsce. Materiały Budowlane nr 6, s.6.
- 20 Christopher B.R., Fisher G.R. (1991): Geotextile Filtration Principles, Practices and Problems. Proceedings of the GRI Seminar.

- 21 Christopher B.R., Holtz R.D. (1985): Geotextile Engineering Manual. Report No. FHWA-TS-86/203, US Federal Highway Administration, Washington DC.
- 22 Dąbrowski W., Parciński W. (1993): Budowa nasypu zbrojonego geowłókniną na łącznicy węzła "Struga". "Drogownictwo" nr 3, 54-57.
- 23 Drzascz R. (1996): O kryteriach doboru geowłóknin. „Drogownictwo“ nr. 11, s. 631-632.
- 24 EBGeo (1997) Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT). Ernst & Sohn, Berlin, 174 s.
- 25 Edel R (2002): Odwodniania dróg. Kładnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- 26 Fischer G.R., Christopher B.R., Holtz R.D. (1990): Filter criteria based on pore size distribution. Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. Hague.
- 27 Garbulewski K. (1992): Wzmacnianie podłoża wałów geowłókniną. W: Projektowanie, modernizacja i technologia wykonania wałów przeciwpowodziowych w trudnych warunkach geotechnicznych. Wyd. Inst. Melioracji i Użytków Zielonych, Falenty, s.109-141.
- 28 Geotekstyli (1998). Poradnik stosowania. (Przekład z francuskiego). Wyd. Beskidzki Instytut Tekstylny, Bielsko-Biała, 70 s.
- 29 Geotekstyli LOTRAK (1996). Poradnik projektanta. DON & LOW Ltd, Forfar, Scotland.
- 30 Geotextiles and geomembranes in civil engineering (1994). Pod red. G.P.T.M. Van Santvoorta. Wyd. A.A.Balkema, Rotterdam, 595 s.
- 31 Geotextiles and geotextile-related products - classification scheme (draft) (1995) Document No.95/ BSI STANDARDS.
- 32 Giroud J.P. (1982): „Filter Criteria for Geotextiles” Proc. 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas. Vol. 1.
- 33 Giroud J.P. (1997): Geotextile Filters: Reliable Design and Installation. Recontres 97, France
- 34 Głowacki P., Petyniak D. (1995): Wzmocnienie skarp konstrukcjami oporowymi z gruntu zbrojonego i gwoździowanego. "Drogownictwo" nr 4,
- 35 Giroud J.P., Noiray L. 1981. „Design of Geotextile Reinforced Unpaved Roads”. Proc. ASCE Geot.Engrg.Div. Vol. 107, No. GT 9.
- 36 Gołos M. (2003): Zastosowanie geosiatek o sztywnych węzłach w budownictwie drogowym. „Drogownictwo” nr 3, s. 94-96.
- 37 Gourc J.P. (1993): Geosynthetics in embankments, review of theory and practice. Keynote lecture. Int. Symp. on Earth Reinforcement Practice, Fukuoka, November 1992, Vol. 2, Wyd. A.A.Balkema, Rotterdam, s. 773-800.
- 38 Grundbau-Taschenbuch (1997 - 1998). Teil 1 - 3, Verl. Ernst und Sohn, Berlin.

- 39 Grzybowska W., Salamon W. (1995): Zastosowanie geotekstyliów w budownictwie drogowym. Seminarium "Geotekstyli", Łódź, s. 10-24.
- 40 Grzybowska W., Wojtowicz J. (1999): Wzmacnianie podłoża nawierzchni drogowej przy zastosowaniu geosyntetyków. Konferencja IBDiM "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe", Kielce, s. 73-82.
- 41 Grzybowska W., Zieliński P. (1998): Funkcje geosyntetyków w konstrukcji nawierzchni drogowej. Konf. N-T "Rozwój technologii w budownictwie drogowym - teoria i praktyka". Wyd. Norbertinum, Lublin, s. 43-63.
- 42 Hartlen J., Wolski W. (1996). Embankments on Organic Soils. Wyd. Elsevier, Amsterdam, 424 s.
- 43 Hufenus R. (2002): Eigenschaften von Geokunststoffen und ihre Überprüfung. "Strasse und Verkehr" nr 10, s. 388-399.
- 44 Hufenus R., Rüegger R. (1999): Hilfsmittel für korrekte Auswahl und Anwendung von Geotextilien. "Strasse und Verkehr" nr 9, s. 335-341.
- 45 Jarominiak A. (1999): Lekkie konstrukcje oporowe. Wyd. 3. WKiŁ, Warszawa, 328 s.
- 46 Jarominiak A., Bichajło L., Flota L., Trojnar K. (1999): Odbudowa drogi krajowej nr 4 na odcinku ul. Krakowskiej w Przemyśle zniszczonym wskutek osuwiska. "Drogownictwo" nr 9, s. 267-278.
- 47 Kempfert H.-G., Stadel M., Zaeske D. (1997): Design of geosynthetic-reinforced bearing layers over piles. Bautechnik nr 12, s. 818-825.
- 48 Kłosiński B., Wileński P. (1996). Zastosowanie krajowych geotekstyliów w budownictwie komunikacyjnym. "Inżynieria i Budownictwo" nr 11, s. 628-630.
- 49 Krzywosz Z., Garbulewski K. (1996): Geotekstyli jako materiał budowlany. "Inżynieria i Budownictwo" nr 11, s. 621-625.
- 50 Litewka P., Przysański J., Florkiewicz A. (1994): Projektowanie nasypów drogowych na gruntach słabonośnych. "Drogownictwo" nr 1, s.15-17.
- 51 Love J., Milligan G. (2003): Design methods for basally reinforced pile-supported embankments over soft ground. Ground Engineering, March 2003, s. 39-43.
- 52 Madej J. (1981): Metody sprawdzania stateczności zboczy. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 143 s.
- 53 Merkblatt (1994) für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- 54 Molisz R., Baran L., Werno M. (1986): Nasypy na gruntach organicznych. WKiŁ, Warszawa, 148 s.
- 55 Müller-Rochholz J., Hemesath A., Recker Ch. (2002): Determination of reduction factors for Geosynthetic Reinforcement. Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, Kielce, str. 249-253.
- 56 Müller-Rochholz J., Recker Ch. (2002): High Strength Geosynthetics for Road Works, European Standardisation and Testing. Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe, Kielce, str. 255-262.

- 57 Nancey A., Mannsbart G., Murray H.: The energy concept - a harmonised language for specifying the separation function of geotextiles. VII Międz. Konf. "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe", Kielce 2001, s. 83-91
- 58 Pachowski J., Kuźmich S. (1987): Stosowanie geotekstyliów do budowy dróg na torfach. "Prace IBDiM" nr 4, s. 71-83.
- 59 Paul A., Schwerdt S., Reuter E., Hortsman J. (2002): Erdfall- und tagesbruchgefährdete Gebiete: Geogitter zur Sicherung von Verkehrswegen. Strassen- und Tiefbau nr 12, s. 6-15.
- 60 Pepol J. (1998): Doświadczenia z budowy nasypu na gruntach organicznych o dużej miąższości. Konf. N-T "Rozwój technologii w budownictwie drogowym - teoria i praktyka". Wyd. Norbertinum, Lublin, s. 105-117.
- 61 Pepol J., Długaszek M. (1990): Zachowanie się nasypu drogowego na podłożu organicznym i włókninie. "Drogownictwo" nr 9, s. 180-184.
- 62 Rankilior P.R. (1997): Geosynthetics Manual. Wyd. BONAR T.F., Lokeren, 287 s.
- 63 Rolla St. (1988). Geotekstyli w budownictwie drogowym. WKiŁ, Warszawa, 128s.
- 64 Rolla St. (1996). Geosyntetyki w budownictwie drogowym (opracowanie). "NwZTDr" nr 127, s. 41-56.
- 65 Rolla St. (2000). Kryteria przydatności geosyntetyków do robót drogowych. "Drogownictwo" nr 8, s. 234-238.
- 66 Rolla St. Kryteria przydatności geosyntetyków do robót drogowych, Drogownictwo 8/2000, s. 234-238.
- 67 Ronisz R. (2000): Zapewnienie jakości geosyntetyków w drogownictwie (opracowanie). "NwZTDr" nr 127, s. 41-56.
- 68 Rowe R.K., Mylleville B.L.J. (1994): Analysis and Design of Reinforced Embankments on Soft or Weak Foundations. W: Soil-Structure Interaction: Numerical Analysis and Modeling. Pod red. J.W. Bulla. Wyd. E&FN Spon, London, s.231-260.
- 69 Rüegger R. (2002): Grundlagen für Anwendung von Geokunststoffen von der Planung bis zur Ausschreibung. "Strasse und Verkehr" nr 10, s. 412-419.
- 70 Saathoff F., Horstmann J. (1999): Geogitter als Bewehrung in ungebundenen mineralischen Schichten (I), „Straßen-und Tiefbau“ nr 5, s. 16-22.
- 71 Sobolewski J., Ajdukiewicz J. (2001): Materiały pomocnicze do projektowania konstrukcji inżynierskich z gruntów zbrojonych materiałami geosyntetycznymi. Huesker, Inora, 24+46 s.
- 72 Sobolewski J., Alexiew D. (1998): Geosyntetyczne systemy zabezpieczające nasypy drogowe na terenach zapadliskowych. Konferencja IBDiM "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe", Kielce, t. 2, s. 137-148.
- 73 Sobolewski J., Alexiew D. (1999): Nasypy drogowe i kolejowe ze zbrojeniem geosyntetycznym w podstawie posadowionych na sztywnych i podatnych palach

- i kolumnach. Konferencja IBDiM "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe", Kielce, s. 151-162.
- 74 Sobolewski J., Ast W. (2003): Geosyntetyczny system zabezpieczający w podstawie węzła kolejowego Groebers, zlokalizowanego na terenie zagrożonym zapadliskami górniczymi. XIII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gliwice-Szczyrk, s. 337-348.
- 75 Seachtling H. (2000): Tworzywa sztuczne – poradnik. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1029 s.
- 76 Technical Handbook (2001): Typar® SF Geotextile, DuPont de Nemours, Luxembourg.
- 77 Technische Lieferbedingungen (1995) für Geotextilien und Geogitter für den Erdbau des Straßenbau. TL Geotex E-Stb 95. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 26 s.
- 78 Topolnicki M. (1996): Posadowienie trasy komunikacyjnej i tunelu dla pieszych na podłożu wzmocnionym kolumnami żwirowo-betonowymi i geosiatką. "Inżynieria Morska i Geotechnika" nr 1.
- 79 Topolnicki M. (1997): Fundamentowanie budowli w warunkach słabego podłoża, ze szczególnym uwzględnieniem obiektów komunikacyjnych. XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gdańsk.
- 80 Uzdalewicz Z: Geosyntetyki w drogownictwie. Drenaż francuski. Bezpieczne Drogi 7/2001
- 81 Werno M., Inerowicz M., Juskiewicz-Bednarczyk B. (1999). Budowa dróg na gruntach organicznych. "Drogownictwo" nr 11, s. 336-343.
- 82 Wesółowski A., Krzywosz Z., Brandyk T. (2000): Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich. Wydawnictwo SGGW, 231 s.
- 83 Wilmers W. (1998): Qualitätssicherung bei der Anwendung von Geotextilien. "Strasse und Tiefbau" nr 11, s. 6-12.
- 84 Wiłun Z. (1987, 2000): Zarys geotechniki. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 723 s.
- 85 Zadroga B. (2000): Nowe technologie w geotechnice. XII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Szczecin-Świnoujście.
- 86 Zastosowanie geosiatek "Tensar" w budownictwie (1996): "Inżynieria i Budownictwo" nr 11, s 640-642.
- 87 ZUAT-15/IV.04 (1997) Geowłókniny w robotach ziemnych i budowlanych. ITB, Warszawa, 14 s.
- 88 Żuchowska D. (2000): Polimery konstrukcyjne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.

Załącznik 1. Klasy wytrzymałości geotekstyliów GRK

Właściwości mechaniczne geowłóknin i geotkanin są w przepisach niemieckich [53, 77], a także w wytycznych krajowych ITB [87] i IBDiM [13], klasyfikowane według klas wytrzymałości GRK (niem. *Geotextilrobustklasse*). Klasy GRK służą do oceny przydatności geotekstyliów do separacji i filtrowania. Podstawą klasyfikacji, podanej w tablicy (tablica 14), jest siła przebijania statycznego w badaniu CBR albo wytrzymałość na rozciąganie (wartości średnie x^* pomniejszone o odchylenie standardowe s - przyjmuje się, że jest to wartość gwarantowana odpowiadająca poziomowi ufności 95%) oraz masa powierzchniowa wyrobu (wartość średnia z badań). Klasyfikacja ta jest uproszczona i nie oddaje w pełni różnych zalet wyrobów, zwłaszcza wyższych klas, lecz jest użyteczna do wstępnego wyboru w typowych, prostych przypadkach zastosowań.

Tablica 14. Kryteria podziału klas wytrzymałości GRK wyrobów geotekstylnych
[53, 77]

Wyroby	Geowłókniny		Geotkaniny z tasiemek		Geotkaniny z wiązek wielowłóknowych	
Klasa wytrzymałości GRK	siła przebijania (badanie CBR) (x^*-s) [kN]	masa powierzchniowa [g/m ²]	wytrzymałość na rozciąganie ^x (x^*-s) [kN/m]	masa powierzchniowa [g/m ²]	wytrzymałość na rozciąganie ^x (x^*-s) [kN/m]	masa powierzchniowa [g/m ²]
GRK 1	≥0,5	≥80	≥20	≥100	≥60	≥230
GRK 2	≥1,0	≥100	≥30	≥160	≥90	≥280
GRK 3	≥1,5	≥150	≥35	≥180	≥150	≥320
GRK 4	≥2,5	≥250	≥45	≥220	≥180	≥400
GRK 5	≥3,5	≥300	≥50	≥250	≥250	≥550

^x) Mniejsza z wartości wytrzymałości wzdłuż i w poprzek pasma

W przypadku kompozytów warstwowych:

- geosiatek lub georusztów połączonych z włókniną (pełniących funkcję rozdzielającą i filtracyjną) klasę wytrzymałości można powiększyć o jeden, jeżeli wytrzymałość na rozciąganie geosiatki lub georusztu wynosi co najmniej 25 kN/m;
- tkanin lub dzianin połączonych z włókniną - klasę wytrzymałości można powiększyć o jeden, za podstawę przyjmuje się wytrzymałość na rozciąganie tkaniny lub dzianiny po ułożeniu warstwy ochronnej;

- w przypadku użycia wyrobu kompozytowego jako drenu powierzchniowego miarodajna jest tylko klasa wytrzymałości samego filtru.

Wyboru rodzaju i gatunku materiału należy dokonywać w zależności od jego przeznaczenia (rodzaju zastosowania) oraz od wymaganych właściwości mechanicznych, odporności na uszkodzenia podczas wbudowania, tarcia po gruncie, odporności na czynniki klimatyczne (atmosferyczne), chemiczne, parametrów hydraulicznych itp.

Wyboru materiałów do typowych zastosowań w budowlach drogowych dokonuje się [53] na podstawie klas wytrzymałości GRK i ewentualnie dodatkowych współczynników bezpieczeństwa. Wymiarowanie materiału na podstawie szczegółowych obliczeń jest konieczne jedynie specjalnych przypadkach.

Tablica 15. Stopnie obciążenia AS geotekstyliów w zależności od rodzaju materiału nasypowego [53, 77]

Stopień obciążenia	Rodzaje zastosowań	
	Materiał o ziarnach obtoczonych (kruszywo naturalne)	Materiał o ostrych krawędziach ziaren (kruszywo łamane)
AS 1	zastosowania, w których naprężenia wywoływane przez materiał nasypowy nie mają wpływu na wybór geotekstyliów	
AS 2	geotekstylium pomiędzy gruntem drobnoziarnistym a gruntami gruboziarnistymi i mieszanymi wg DIN 18196	—
AS 3	geotekstylium pomiędzy gruntem drobnoziarnistym a gruntami gruboziarnistymi i mieszanymi (do 40% frakcji kamienistej)	geotekstylium pomiędzy gruntem drobnoziarnistym a gruntami gruboziarnistymi i mieszanymi wg DIN 18196
AS 4	geotekstylium pomiędzy gruntem drobnoziarnistym a gruntami gruboziarnistymi i mieszanymi (> 40% frakcji kamienistej)	geotekstylium pomiędzy gruntem drobnoziarnistym a gruntami gruboziarnistymi i mieszanymi (do 40% frakcji kamienistej)
AS 5	—	geotekstylium pomiędzy gruntem drobnoziarnistym a gruntami gruboziarnistymi i mieszanymi (> 40% frakcji kamienistej)

Tablica 16. Rodzaje obciążeń AB geotekstyliów podczas wbudowania i użytkowania [53, 77]

Rodzaje obciążeń	Wbudowanie materiału nasypowego	Zagęszczanie	Obciążenie ruchem budowlanym
AB 1	ręczne	bez wpływu	brak ruchu budowlanego
AB 2	maszynowe	maszynowe	małe (koleiny < 5 cm)
AB 3	maszynowe	maszynowe	duże (koleiny 5 do 15 cm)
AB 4	maszynowe	maszynowe	bardzo duże (koleiny ponad 15 cm)

Tablica 17. Ustalenie klasy wytrzymałości GRK wyrobu geotekstylnego [53, 77]

Stopień obciążenia	Rodzaj obciążenia przy wbudowaniu i ruchem budowlanym			
	AB 1	AB 2	AB 3	AB 4
AS 1	GRK 1	–	–	–
AS 2	GRK 2	GRK 2	GRK 3	GRK 4
AS 3	GRK 3	GRK 3	GRK 4	GRK 5
AS 4	GRK 4	GRK 4	GRK 5	(1)
AS 5	GRK 5	GRK 5	(1)	(1)
(1) W takich warunkach zastosowań należy przeprowadzić próby na budowie lub zwiększyć grubość warstwy nasypu				

Zgodnie z przepisami [53, 77] wymagana klasa GRK zależy od stopnia obciążenia, wynikającego z właściwości materiału nasypowego oraz od warunków wbudowania i obciążenia eksploatacyjnego.

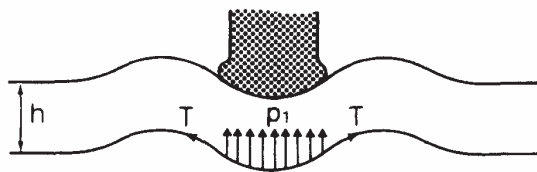
Sposób postępowania jest następujący:

- na podstawie tablicy (tablica 15) ustala się stopień obciążenia AS,
- na podstawie tablicy (tablica 16) ustala się rodzaj obciążenia AB,
- z tablicy (tablica 17) wyznacza się potrzebną klasę wytrzymałości wyrobu geotekstynnego.

Załącznik 2. Projektowanie nawierzchni wzmocnionych geotekstylami

Wyrób geosyntetyczny umieszczony między podłożem a warstwami nawierzchni spełnia trzy funkcje.

- a) Materiał geosyntetyczny pełni funkcję rozdzielania i pozwala utrzymać pierwotnie wykonaną grubość warstwy nasypu. W przypadku braku warstwy rozdzielającej kruszywo pod wpływem nacisków kół miesza się z podłożem i efektywna grubość warstwy konstrukcyjnej maleje w czasie.
- b) Jeżeli zapewniona jest dobra przyczepność warstwy kruszywa i materiału geosyntetycznego o dużej sztywność, to przejmuje on częściowo lub całkowicie naprężenia poziome pochodzące od nacisku kół. Dzięki przejściu tych naprężeń stycznych zbrojenie geosyntetyczne zwiększa obciążenie pionowe, jakie może być przekazane na podłoże bez wywołania nadmiernych odkształceń pionowych.
- c) Jeżeli działający nacisk przekroczy nośność podłoża, to na powierzchni warstwy kruszywa powstaną koleiny i znajdą one odbicie w podłożu. Odkształcenia te wywołają w zbrojeniu geotekstylnym siłę rozciągającą T (rys. 27). Siła ta wywoła dwa efekty. Po pierwsze spowoduje ona działające dośrodkowo poziome naprężenia ścinające na powierzchni podłoża, które zwiększą jego nośność. Po drugie - siła rozciągająca T wywoła skierowane do góry naprężenie pionowe p_1 (rys. 27). Naprężenie to jest spowodowane pracą statyczną zbrojenia jako powłoki.



Rys. 27. Siła rozciągająca w zbrojeniu geotekstylnym [29]

Poniżej przedstawiono przykładowy sposób projektowania nawierzchni nieulepszonych [29].

Dane wejściowe.

W celu ustalenia niezbędnych parametrów obliczeniowych projektant powinien podać następujące dane:

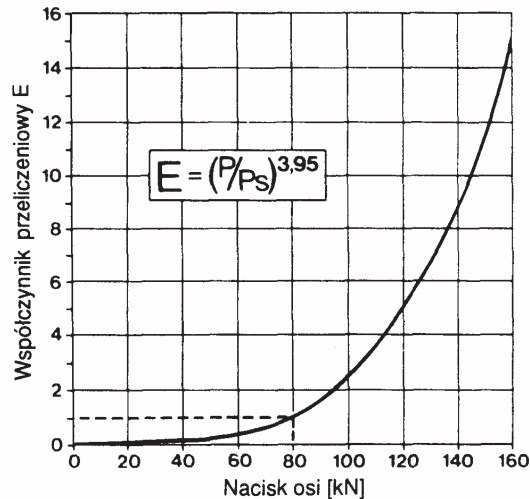
- a) Nośność podłoża

Nośność podłoża jest zwykle wyrażana przez wartość wskaźnika CBR. Posługując się wartością CBR, do obliczeń należy przyjmować jego wartości reprezentatywne dla warunków gruntowo-wodnych realizowanego etapu budowy.

b) Obciążenie ruchem

Należy określić obciążenie każdej osi i liczbę przejazdów, a następnie sprowadzić do równoważnej liczby osi standardowych o nacisku 80 kN stosując współczynnik przeliczeniowy: $E = (P/P_{\text{standard}})^{3,95}$ lub korzystając z nomogramu na rys. 28.

Aby otrzymać równoważną liczbę przejazdów osi standardowej mnoży się rzeczywistą liczbę przejazdów przez współczynnik E.



Rys. 28 Nomogram do przeliczenia obciążenia na osie standardowe

c) Głębokość kolein

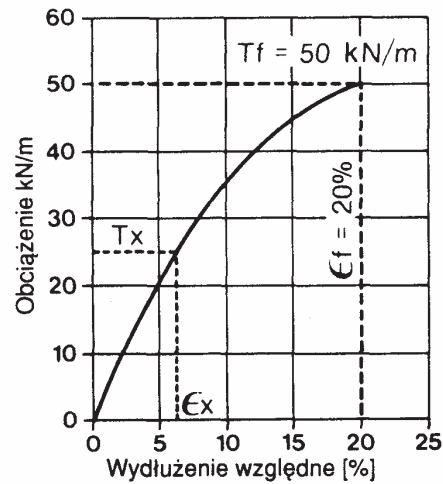
Maksymalną dopuszczalną głębokość kolein (odkształceń) dla typu ruchu przewidzianego na drodze określa się w granicach: 75 mm, 150 mm, 225 mm lub 300 mm.

d) Właściwości geotekstyliów

Jeżeli przewidziano użycie określonego materiału, to potrzebna jest znajomość jego umownego (siecznego) modułu odkształcenia K [kN/m].

Można również obliczyć maksymalną możliwą oszczędność w grubości nawierzchni, która determinuje niezbędny moduł materiału. Ogólnie, im mniej odkształcalny jest materiał tj. im większy jest jego moduł, tym większa jest oszczędność grubości kruszywa.

Moduł materiału geotekstylnego może być wyrażony jako moduł sieczny, a zatem jeśli przy odkształceniu ε_x siła wynosi T_x (rys. 29), daje to wartość modułu $K = T_x / \varepsilon_x$ [kN/m].



Rys. 29. Typowa krzywa obciążenie-wydłużenie

Oczywiście, jeśli zależności odkształcenia od obciążenia geotekstyliów są nieliniowe, to moduł będzie się zmieniać z odkształceniem: od dużego przy małych odkształceniach do mniejszego przy dużych odkształceniach. W żadnym przypadku nie może być przekroczona wytrzymałość ani graniczne wydłużenie materiału geotekstylnego.

Uwaga: ϵ_x oznacza rzeczywistą wartość wydłużenia względnego (stosunek wydłużenia liniowego do początkowej długości odcinka).

Jako wartość wyjściową do obliczeń zaleca się przyjmować wartość modułu siecznego odpowiadającą względnemu wydłużeniu 10%.

Wyznaczanie grubości warstw kruszywa

Należy wybrać wykres z odpowiednią głębokością kolein (rys. 30, rys. 31, rys. 32, rys. 33). Dla wartości c_u lub CBR należy poprowadzić linię pionową do przecięcia krzywej odpowiadającej liczbie przejść osi N. Może być konieczna interpolacja. Z punktu przecięcia prowadzi się linię poziomą do osi pionowej, na której odczytuje się potrzebną grubość konstrukcji niezbrojonej (h_0').

Następnie należy powtórzyć postępowanie, prowadząc pionową linię do krzywej, odpowiadającej materiałowi geotekstylnemu o wybranym module odkształcenia i odczytuje redukcję grubości Δh . Potrzebna grubość konstrukcji wynosi $h_0' - \Delta h$.

Należy sprawdzić, czy względne wydłużenie materiału geotekstylnego nie jest większe od wartości niszczącej.

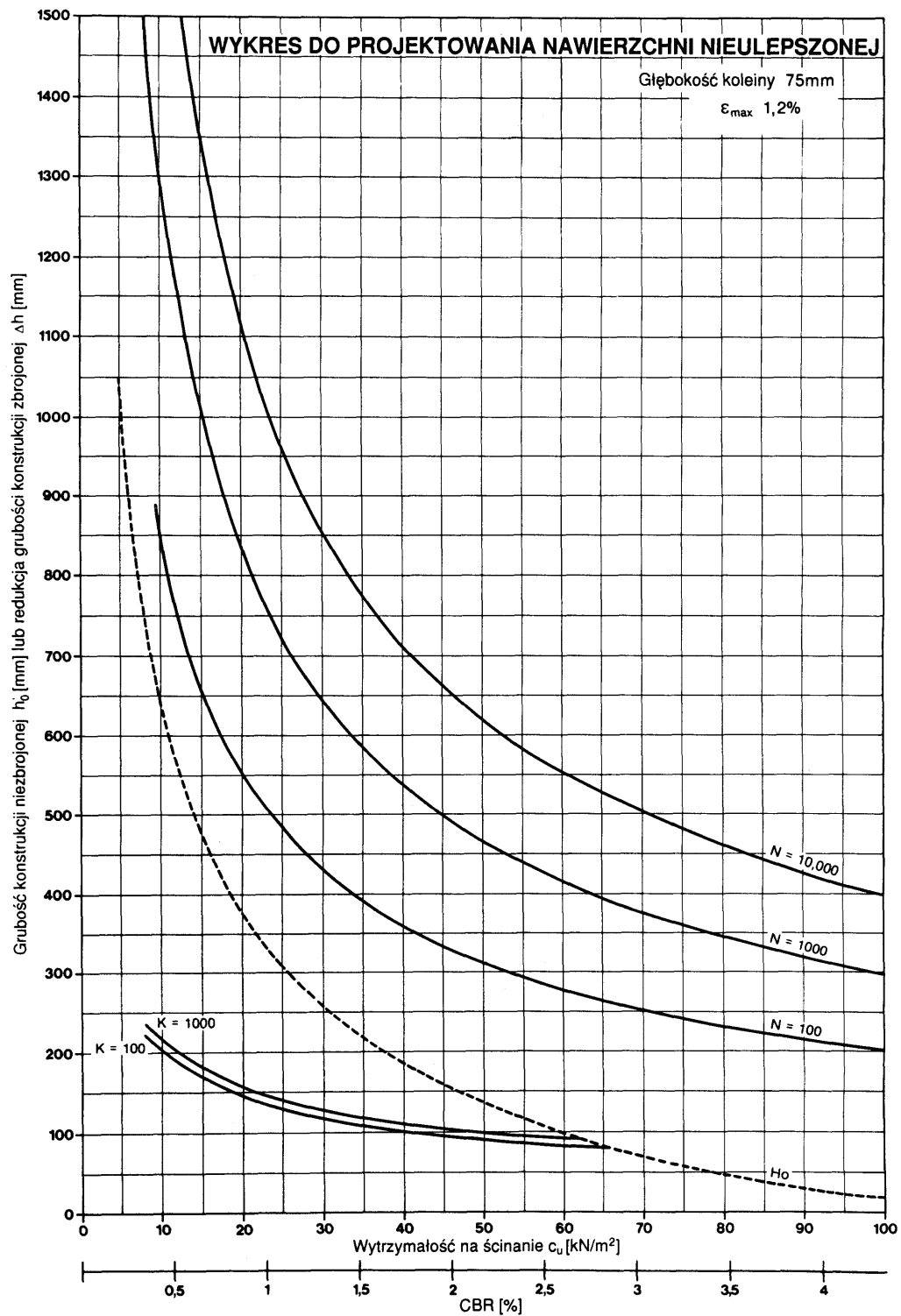
W przypadku głębokości kolein 75 i 150 mm maksymalne odkształcenie względne wynosi odpowiednio 1,2% i 4,2%.

Dla pośredniej głębokości kolein interpoluje się pomiędzy liniami jednakowego odkształcenia w zależności od wytrzymałości na ścinanie c_u i modułu K . Można skorzystać z wykresu zależności modułu K wybranego gatunku materiału od odkształcenia względnego, aby określić rzeczywistą wartość K , odpowiadającą zadanej wartości odkształcenia oraz współczynnika bezpieczeństwa na zerwanie.

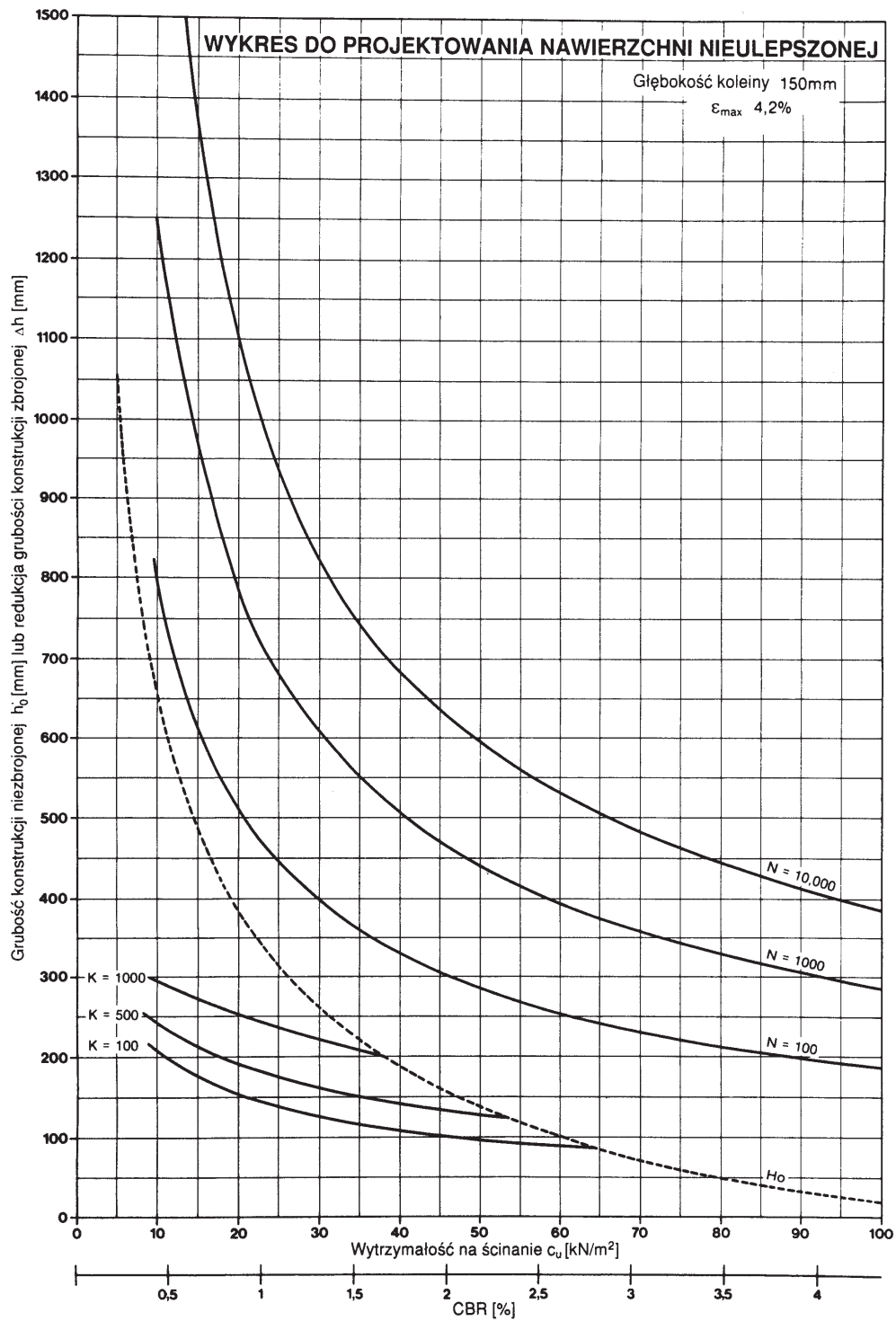
Można też, aby uzyskać jak największą oszczędność grubości konstrukcji, wybrać wykres odpowiadający głębokości kolein i dla odpowiedniej wartości c_u poprowadzić pionową linię do przecięcia z linią przerywaną H_0 , odczytać wartość Δh na osi pionowej i interpolować potrzebny moduł materiału. Wartość h_0' określa się jak poprzednio. Grubość konstrukcji wynosi $h_0' - \Delta h$.

Wartość Δh dla określonej wytrzymałości c_u będzie zmieniać się w zależności od modułu K materiału geotekstylnego: Δh zwiększa się ze wzrostem K . Istnieje jednak górna granica wartości Δh , którą przedstawia na wykresie linia przerywana H_0 .

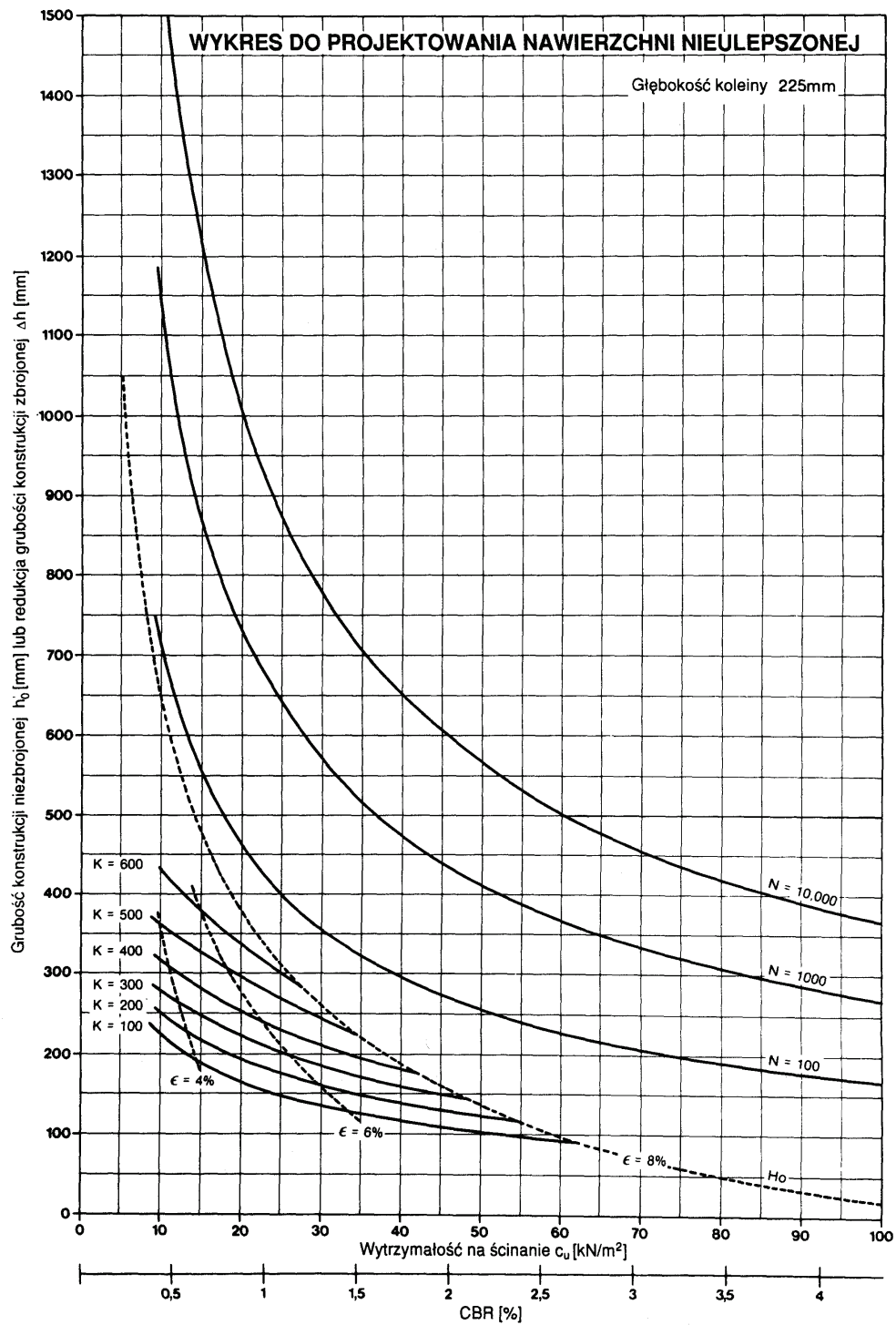
W praktyce grubość konstrukcji nie powinna być mniejsza od 150 mm, powinna ona również sięgać dostatecznie głęboko poniżej spodu koleiny.



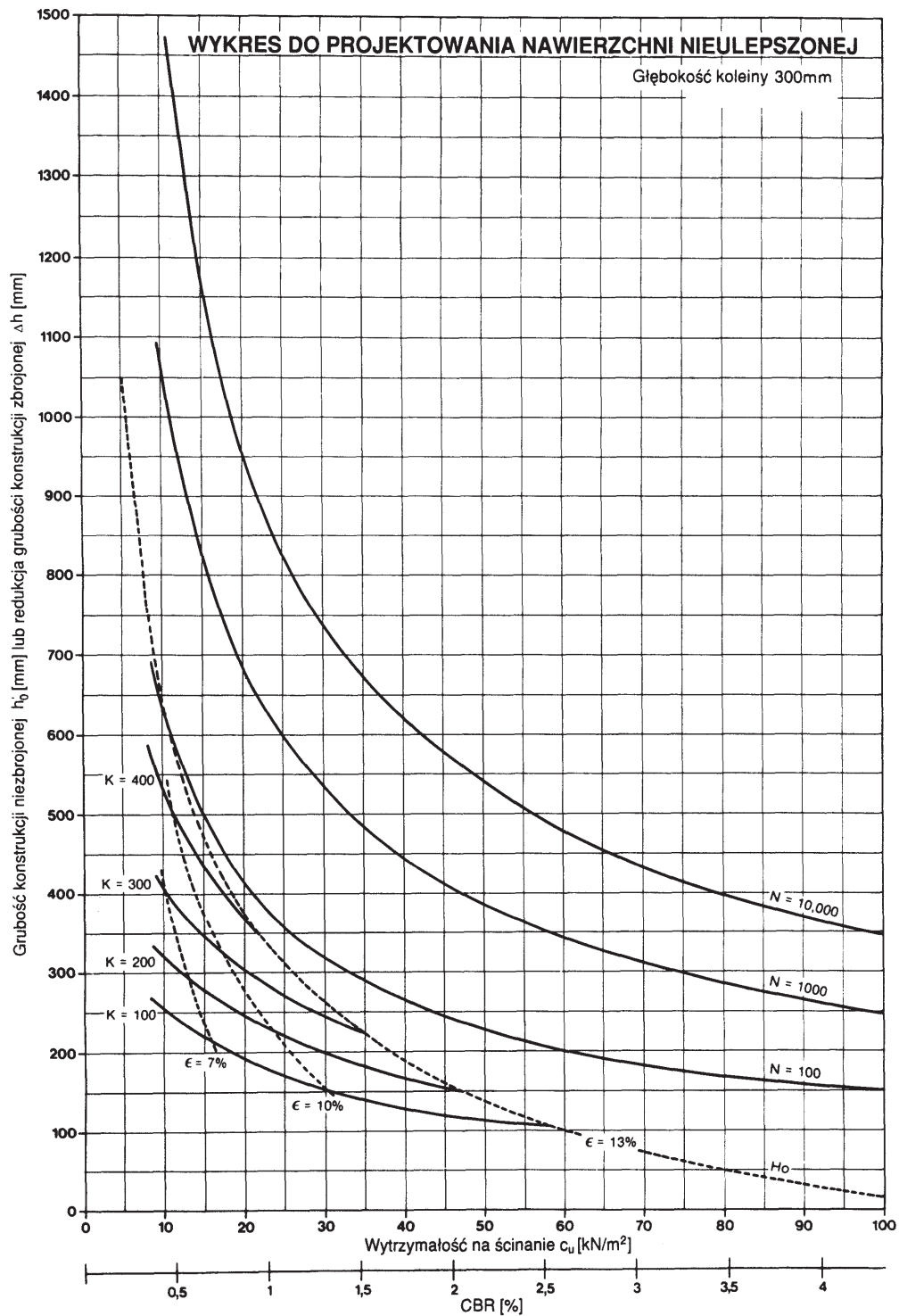
Rys. 30. Wykres do obliczania grubości nawierzchni przy głębokości koleiny 75 mm



Rys. 31. Wykres do obliczania grubości nawierzchni przy głębokości koleiny 150 mm



Rys. 32. Wykres do obliczania grubości nawierzchni przy głębokości koleiny 225 mm



Rys. 33. Wykres do obliczania grubości nawierzchni przy głębokości koleiny 300 mm

Załącznik 3. Obliczanie stateczności nasypu na słabym podłożu wzmocnionym geosyntetykami

Podstawy i ogólne zasady wymiarowania nasypu na słabym podłożu ze zbrojeniem geotekstylnym podstawy podano w p. 7.3.2. Wymieniono tam formy stanu granicznego nośności nasypu na słabym podłożu i wymagane sprawdzenia. W niniejszym załączniku przedstawiono propozycje sposobu wymiarowania zbrojenia nasypu, oparte na dostępnym piśmiennictwie zagranicznym.

Dane wejściowe. Dane potrzebne do sprawdzenia stanów granicznych i zaprojektowania zbrojenia nasypu na słabym podłożu obejmują informacje o nasypie, gruncie podłoża oraz o materiale geotekstylnym.

a) Nasyp:

- wysokość H [m] i szerokość korony B_0 [m],
- kąt tarcia wewnętrznego Φ gruntu nasypu (o ile jest to grunt niespoisty),
- ciężar objętościowy $[\text{kN/m}^3]$
- obciążenia zewnętrzne na naziomie.

b) Grunt podłoża:

- wytrzymałość przy szybkim ścinaniu $c_u = t_f$ $[\text{kN/m}^2]$,
- długotrwałe (efektywne) parametry wytrzymałościowe c' $[\text{kN/m}^2]$ i Φ' [stopni],
- ciężar objętościowy $[\text{kN/m}^3]$,
- współczynnik konsolidacji C_v [m/rok],
- poziomy zwierciadła wody gruntowej, początkowy i docelowy.

c) Materiał zbrojenia:

- kąt tarcia gruntu nasypu po zbrojeniu d [stopni] lub współczynnik tarcia m ,
- przyczepność (adhezja) pomiędzy gruntem podłoża a zbrojeniem $[\text{kN/m}^2]$,
- wytrzymałość i odkształcalność zbrojenia, zmienność tych parametrów w czasie (spadek wytrzymałości, pełzanie),
- odporność tworzywa na czynniki środowiskowe, temperaturę itp.

Stateczność długotrwała. Pierwszą fazą projektowania nasypu jest określenie klasycznymi metodami jego geometrii tak, aby zachował długotrwałą stateczność. Wytrzymałość na ścinanie materiału nasypu oraz gruntu podłoża można modelować przyjmując odpowiednio zredukowane parametry efektywne c' i Φ' . Można uwzględnić przy tym wzrost wytrzymałości słabego gruntu, związany z jego konsolidacją pod ciężarem nasypu (o ile dysponuje się odpowiednimi danymi do obliczeń), a także długotrwały rozkład ciśnień wody w porach nasypu i gruntu podłoża.

Jeżeli grunt pod nasypem jest bardzo słaby, to pochylenia skarp bocznych, wynikające z długotrwałej stateczności, mogą się okazać zbyt strome z uwagi na stateczność w fazie początkowej, nawet z uwzględnieniem zbrojenia. W takim przypadku pochylenia te trzeba tak złagodzić, by spełniony był warunek stateczności krótkotrwałej.

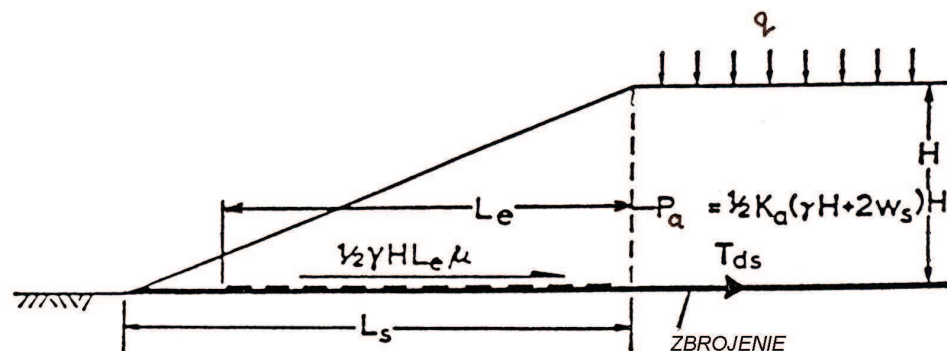
Zbrojenie podłoża zwykle nie jest uwzględniane w ocenie stateczności długotrwałej.

Stateczność krótkotrwała. Celem sprawdzenia stateczności jest określenie potrzeby i ilości zbrojenia w podłożu nasypu. Należy rozpatrywać trzy możliwe postacie zniszczenia nasypu:

- utratę wewnętrznej stateczności nasypu (poziomy poślizg części nasypu, wyparcia na bok słabego podłoża),
- utratę ogólnej stateczności budowli po cylindrycznej powierzchni poślizgu,
- przekroczenie nośności słabego podłoża nasypu.

Podawane w różnych pracach i przepisach zasady obliczeń są zróżnicowane, podobnie jak wymagane współczynniki bezpieczeństwa. Przedstawiona procedura obliczeń stanowi adaptację dostosowanych do praktyki krajowej wymagań normy brytyjskiej BS 8006, dotyczącej gruntów zbrojonych.

Stateczność wewnętrzna nasypu. Sprawdzeniu podlega warstwa nasypu spoczywająca na powierzchni górnej warstwy zbrojenia. Stosuje się typowe metody obliczeń stateczności blokowej, opisane np. w podręczniku Z. Wiłuna [84].



Rys. 34. Stateczność styku zbrojenia i nasypu

Boczna część nasypu może doznać poślizgu po wierzchu warstwy zbrojenia (rys. 34). Ma to miejsce w przypadku, gdy opór tarcia na styku zbrojenia z gruntem jest mniejszy od wypadkowej sił poziomych w korpusie nasypu. Zwykle zakłada się, że siła pozioma wywołująca poślizg jest wypadkową czynnego parcia gruntu P_a .

$$P_a = 0,5 K_a (g H + 2 q) H$$

Siła utrzymująca tarcia gruntu skarpy wynosi:

$$P_r = 0,5 \gamma H L_e m$$

gdzie: $K_a = \tan^2 (45 - 0,5 \Phi')$ - współczynnik parcia czynnego gruntu nasypu,

γ - ciężar objętościowy gruntu nasypu,

H - wysokość nasypu ponad warstwą zbrojenia,

q - obciążenie jednostkowe powierzchni nasypu,

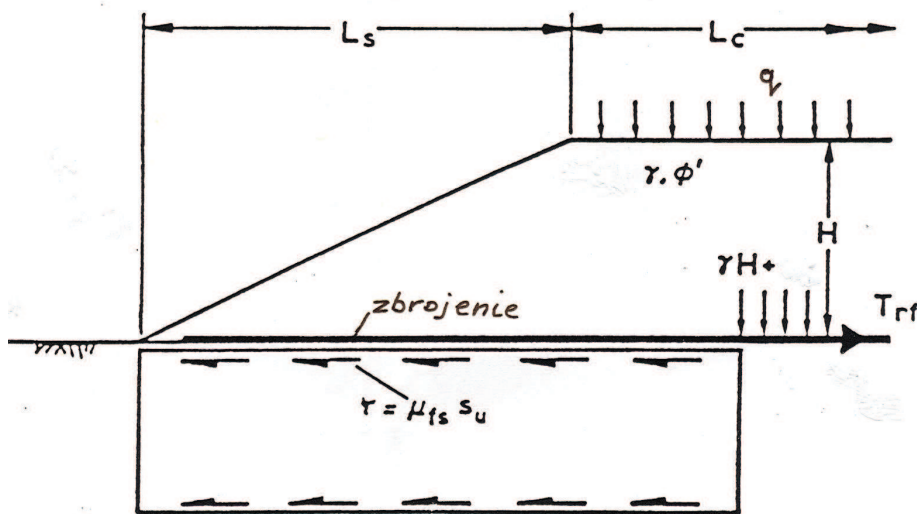
L_e - efektywna długość zakotwienia zbrojenia w skarpie nasypu,

m - współczynnik tarcia pomiędzy zbrojeniem i gruntem, który powinien być określony doświadczalnie.

Powinien być spełniony warunek:

$$P_a \leq P_r m_t$$

gdzie m_t - współczynnik korekcyjny, zwykle przyjmowany równy $1/1,5 = 0,67$ w przypadku stosowania charakterystycznych obciążeń i parametrów geotechnicznych.



Rys. 35. Sprawdzenie możliwości wyparcia podłoża nasypu

Należy również sprawdzić warunek stateczności podłoża. Sprawdzeniu podlega równowaga bloku słabego podłoża pod skarpą nasypu, wypychanego w bok przez nacisk z góry (rys. 35). Parcie na blok jest równoważone przez opory gruntu. Należy spełnić dwa warunki: opory gruntu na dolnej powierzchni zbrojenia powinny być wystarczające, by przejąć działające parcie podłoża oraz wytrzymałość zbrojenia i jego zakotwienie powinny umożliwiać przejęcie działającej siły rozciągającej. Potrzebna siła w zbrojeniu wynosi

$$T_{rf} = (L_s + 0,5L_c) m_{fs} s_u / f_{su}$$

gdzie L_c - szerokość korony nasypu (w przypadku dużej szerokości gdy $L_c > L_e$ wyrażenie w nawiasie należy zastąpić przez wartość $1,5 L_e$,

$s_u = t_f$ - wytrzymałość na ścinanie "bez odpływu" słabego podłoża (np. pomierzona sondą krzyżakową),

m_{fs} - współczynnik tarcia pomiędzy zbrojenie i słabym podłożem,

f_{su} - cząstkowy współczynnik bezpieczeństwa dotyczący wytrzymałości słabego podłoża. Jeżeli wytrzymałość s_u jest wyznaczana na podstawie badania z dużym przemieszczeniem (rezydualna), to wówczas przyjmuje się $f_{su} = 1,0$.

Dopuszczalna siła w zbrojeniu powinna być większa od sumy siły T_{ds} (równej wypadkowej parcia gruntu P_a) oraz siły T_{rf} . Ponadto pochylenie skarpy nasypu powinno zapewniać lokalną stateczność jej powierzchni.

Stateczność ogólna nasypu. Sprawdzenie polega na wyznaczeniu w typowy sposób (zwykle metodą szwedzką, czasem Bishopa lub inną) minimalnego współczynnika stateczności F na obrót po kołowej powierzchni poślizgu. Zalecane jest obliczanie dla efektywnych parametrów wytrzymałościowych Φ' i c' oraz staranne uwzględnianie rozkładu i zmian ciśnienia wody w porach.

Wpływ zbrojenia uwzględnia się przez wprowadzenie dodatkowej siły utrzymującej, powstającej w zbrojeniu. Siła ta zwiększa moment sił utrzymujących w równaniu na współczynnik stateczności, który zazwyczaj nie powinien być mniejszy od 1,3 (Rozporządzenie MTiGM z 1999 r. [6] wymaga aż 1,5, co nie ma uzasadnienia w praktyce). Różnie jest przyjmowany kierunek działania tej siły. Najbardziej ostrożne jest przyjęcie, że działa ona poziomo - wzdłuż zbrojenia. Jednak istnieją też propozycje zalecające korzystniejszy kąt działania siły - w przedziale od poziomego aż do stycznego do kołowej powierzchni poślizgu. Przemawia za tym argument, iż wiotkie zbrojenie tekstylne w strefie ścięcia gruntu ulega zagięciu i przenosi siłę równą pełnej wytrzymałości zbrojenia, a nie tylko jej składowej poziomej. Tak więc składowa siły utrzymującej może mieć wartość od $T_d \cos \alpha$ do bliskiej T_d , gdzie kąt α oznacza pomiędzy zbrojeniem a styczną do powierzchni ścięcia. Założenia takie są stosowane w programach komputerowych służących do obliczania stateczności nasypów i skarp zbrojonych geotekstylami. Przybliżone obliczenie siły w zbrojeniu można wykonać "ręcznie", lecz byłoby to bardzo pracochłonne. Można też wykorzystać typowy program do obliczania stateczności skarp, lecz musi on w wynikach podawać wartości momentu utrzymującego i wywracającego.

W przypadku małej grubości warstwy słabego podłoża krytyczna powierzchnia ścięcia może nie przebiegać po linii kołowej, lecz bardziej płasko. Obliczenie dla

kołowej powierzchni może spowodować zaniżenie potrzebnej wytrzymałości zbrojenia nawet o 20%. W takich przypadkach wskazane jest obliczenie stateczności innymi metodami, np. Janbu lub Nonveiller (Wiłun 1987, Madej 1981).

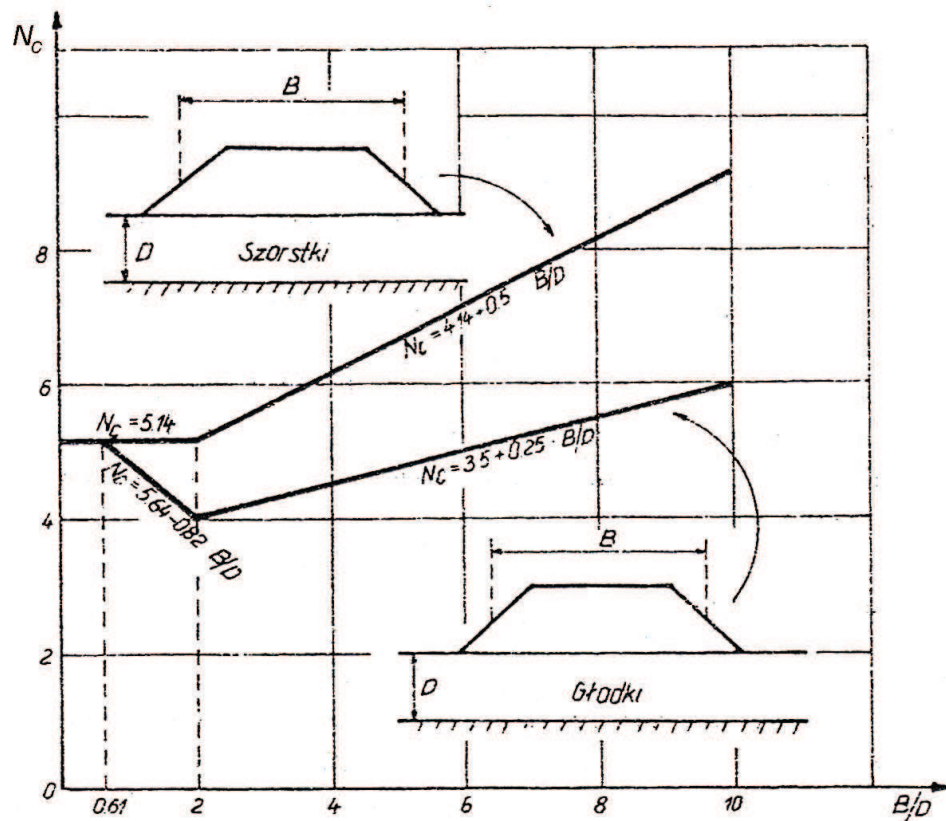
Nośność słabego podłoża nasypu. Utrata nośności podłoża (rys. 14d) następuje w wyniku cylindrycznego ścicia w obrębie słabej warstwy podłoża. Nośność oblicza się jak fundamentu bezpośredniego z warunku

$$\gamma H < c_u N_c$$

gdzie: γ - ciężar objętościowy gruntu nasypu [kN/m^3],

H - wysokość nasypu [m],

$c_u = t_f$ - wytrzymałość na ścinanie (spójność) gruntu podłoża przy szybkim ścinaniu (bez odpływu) [kN/m^2],



Rys. 36. Współczynnik nośności N_c do obliczenia nośności podłoża nasypu [27]

N_c - współczynnik nośności [-].

Wartości współczynnika N_c można przyjmować z rys. 36 [27] w zależności od stosunku średniej szerokości nasypu B do miąższości słabej warstwy D , przy czym styk należy traktować jako gładki, jeśli opory ścinania pomiędzy gruntem a zbrojeniem są mniejsze od wytrzymałości gruntu, w przeciwnym razie styk można uznać za szorstki. W przypadku, gdy stosunek $B/D < 3$, to nośność podłoża można sprawdzać stosując wzory

$$\gamma H < 2 c_u B/D \quad \text{lub} \quad \gamma H < 4 c_u.$$

Projektowanie zbrojenia. Potrzebny przekrój zbrojenia wynika z dwóch warunków: albo z sumy sił wypadkowej parcia gruntu P_a oraz siły T_{rf} potrzebnych do zachowania stateczności wewnętrznej i stateczności podłoża, albo z warunku stateczności ogólnej przy cylindrycznej powierzchni poślizgu. Miarodajna jest większa z tych sił. Otrzymaną z obliczeń potrzebną siłę w zbrojeniu należy przenieść przez odpowiedni jego przekrój. Wymiarowanie go nie jest sprawą prostą, brak jest krajowych przepisów, jak i szerszych doświadczeń w tym względzie.

Użyteczna siła w zbrojeniu stanowi ułamek jego doraźnej wytrzymałości. Konkretnie wartości określa się w zależności od rodzaju tworzywa i wyrobu oraz warunków pracy zbrojenia. Należy uwzględnić przewidywany czas użytkowania - czy zapewnia ono tylko okresową stateczność, czy też bezpieczeństwo w ciągu całego okresu trwałości budowli np. [23, 53]. Zasady wymiarowania zbrojenia podano w p. 4.7.

Należy też sprawdzić, czy potrzebna siła w zbrojeniu zostanie wzbudzona przy zachowaniu dopuszczalnych odkształceń budowli. Należy też uwzględnić nierównomierne osiadania w przekroju poprzecznym nasypu (największe w pobliżu osi).

Załącznik 4. Projektowanie drenaży z użyciem geosyntetyków

A. Przegląd wybranych kryteriów doboru parametrów materiałów filtracyjnych i separacyjnych

Geotekstylia stosowane w systemach drenażowych powinny spełniać odpowiednie kryteria dotyczące właściwości hydraulicznych i mechanicznych. Kryterium dotyczące właściwości hydraulicznych gwarantuje, że geotekstylia są zdolne do pełnienia funkcji drenażowych lub filtracyjnych w ciągu projektowanego okresu eksploatacji. Wśród nich można wyróżnić kryteria: zatrzymywania cząstek gruntu, przepuszczalności i odporności na kolmatację. Kryterium dotyczące właściwości mechanicznych gwarantuje zachowanie trwałości struktury geotekstyliów zarówno podczas wbudowania, jak i w projektowanym okresie eksploatacji. Kryterium to obejmuje wytrzymałość mechaniczną na rozciąganie i przebicie.

Kryterium zatrzymywania cząstek gruntu [16]

Filtr powinien zatrzymywać grunt, pozwalając przy tym na przeniknięcie przez niego drobnych cząstek gruntu niesionych przez wodę. W 1985 roku Christopher i Holtz [21] przedstawili koncepcję pracy filtra, według której pewna ilość cząstek gruntu przenika przez geotekstylię. Ma to na celu zminimalizowanie zatykania się filtra. W tabelicy (tablica 18) przedstawiono różne kryteria przyjmowane dla geotekstyliów w przypadku przepływu laminarnego.

Kryterium przepuszczalności

Zestawienie stosowanych kryteriów przepuszczalności zawarto w tabelicy (tablica 19). Przyjmuje się w nich, że w celu zabezpieczenia przed nadmiernym wzrostem ciśnienia wody w porach i do utrzymania odpowiedniego wydatku przepływu geotekstylię powinny charakteryzować się odpowiednią przepuszczalnością.

Tablica 18. Kryteria zatrzymywania cząstek gruntu dla geotekstyliów [16, 26]

Źródło	Kryterium	Uwagi
Calhoun (1972)	$O_{95}/d_{95} < 1$ $O_{95} < 0,2 \text{ mm}$	tkaniny > 50% ziaren przechodzi przez sito nr 200 (0,075 mm); tkaniny, grunty spoiste
Zischer (1975) (Rankilor, 1981)	$O_{50}/d_{50} < 1,7-2,7$ $O_{50}/d_{50} < 25-37$	tkaniny $U < 2$, $d_{50} = 0,1-0,2 \text{ mm}$ włókniny, grunty spoiste
Ogink (1975) Sweetland (1977)	$O_{90}/d_{90} < 1$ $O_{90}/d_{90} < 1,8$ $O_{15}/d_{85} < 1$ $O_{15}/d_{15} < 1$	tkaniny włókniny włókniny $U = 1,5$ włókniny $U = 4$
ICI Fibers (1978) Rankilor, 1981)	$O_{50}/d_{85} < 1$ $O_{15}/d_{15} > 1$	włókniny $0,02 < d_{85} < 0,25 \text{ mm}$ włókniny $d_{85} > 0,25 \text{ mm}$
Schober i Teindl (1979) bez współczynnika bezpieczeństwa	$O_{90}/d_{50} < 2,5-4,5$ $O_{90}/d_{50} < 4,5-7,5$	tkaniny, cienkie włókniny, zależne od U grube włókniny, zależnie od U; pył i piasek
Millar Ho i Turnbull (1980)	$O_{50}/d_{85} < 1$	tkaniny i włókniny
Giroud (1982)	$O_{95}/d_{50} < (9-18)U$	zależnie od U i zagęszczenia
Carroll (1983)	$O_{95}/d_{85} < 2-3$	tkaniny i włókniny
Christopher i Holtz (1985)	$O_{95}/d_{85} < 1-2$ $O_{95}/d_{15} < 1$ lub $O_{50}/d_{85} < 0,5$	zależnie od gruntu i U przepływ dynamiczny, pulsacyjny i cykliczny
Francuski komitet Geowłóknin i Geomembran (1986)	$O_{50}/d_{85} < 0,38-1,25$	zależnie od rodzaju gruntu, zagęszczenia i warunków hydraulicznych
Fischer, Christopher i Holtz (1990)	$O_{95}/d_{85} < 0,8$ $O_{50}/d_{15} < 1,8-7,0$ $O_{50}/d_{50} < 0,8-2,0$	oparte na podziale wielkości porów w geotekstyliach, zależne od U
O_{95} , d_{95} – średnice miarodajne odpowiednio dla geofiltera i gruntu U – wskaźnik różnoziarnistości		

Tablica 19. Kryteria przepuszczalności geotekstyliów [16, 26]

Źródło	Kryterium	Uwagi
Calhoun (1972), Schober i Treindl (1979), Wates (1980), Carrol (1983), Haliburton (1982), Christopher i Holtz (1985)	$k_f > k_s$	przepływ laminarny, dla niekrytycznych zastosowań i nieskomplikowanych warunków gruntowych
Carroll (1983), Christopher i Holtz (1985)	$k_f > 10 k_s$	krytyczne zastosowania, skomplikowane warunki gruntowe
Giroud (1982)	$k_f > 0,1 k_s$	brak współczynników bezpieczeństwa
k_f – współczynnik wodoprzepuszczalności filtra k_s – współczynnik wodoprzepuszczalności gruntu		

Kryterium odporności na kolmatację

Na skutek migracji drobnych cząstek gruntu do wnętrza geotekstyliów filtr ulega kolmatacji. Powoduje to spadek jego przepuszczalności. Kolmatacja zależy od relacji między ziarnami i cząstkami w gruncie oraz od ich zdolności blokowania porów w geotekstyliach.

Kryteria odporności na kolmatację w typowych warunkach zastosowań [16, 18]:

1. Badanie filtracji grunt – geotekstyli
2. Zakresy minimalnych wymaganych charakterystycznych wielkości porów dla gruntów zawierających cząstki drobne:
 $O_{95} > 3d_{15}$ dla $U > 3$ (Christopher i Holtz 1985, 1989)
 $O_{15}/d_{15} > (0,8-1,2)$; $O_{50}/d_{50} > (0,2-1,0)$ (Fischer i inni 1990)
3. Dla $U < 3$ geotekstyli z maksymalnymi wielkościami porów należy określić według kryteriów zatrzymywania.
4. Wartości przestrzeni wolnych.
 Tkane geotekstyli więcej niż (4-6)% wolnych przestrzeni (Colhoun 1972, Koerner 1990)
 Nietkane geotekstyli (włókniny) więcej niż (30-40)% wolnych przestrzeni (Christopher i Holtz 1985, Koerner 1990)

W trudnych warunkach gruntowo wodnych zaleca się wykonanie badań filtracji na miejscu.

Klasyfikacja geotekstyliów warstw separacyjnych i filtrów ze względu na właściwości hydrauliczne

Wymagania stawiane geotekstyliom związane z przynależnością do określonej

klasy właściwości hydraulicznych dotyczą charakterystycznej wielkości porów wyznaczonej zgodnie z BS 6906:Part 2:1989 i przepływu wody przez geotekstylię wyznaczonego według BS 6906:Part 3:1989. Klasyfikacja rozpoczyna się od 0 i kończy na 5. Każdą klasę definiuje dolny i górny próg wymagań. Geotekstylię zaliczone do klasy wyższej mogą, ale nie muszą spełniać wymagań klas niższych. Spowodowane jest to tym, że zarówno dolne jak i górne ograniczenia klas odpowiadają charakterystycznej wielkości porów.

Wymagania stawiane geotekstyliom związane z przynależnością do określonej klasy właściwości hydraulicznych zestawiono w tablicy (tablica 20).

Tablica 20. Klasyfikacja filtrów ze względu na właściwości hydrauliczne [16, 31]

Klasa właściwości hydraulicznych	Charakterystyczny wymiar porów ¹ [μm]	Prędkość przepływu wody ² przy ΔH = 100 mm [l/(m ² ·s)]
Klasa 0	≤ 500	≥ 5
Klasa 1	250 < O ₉₀ ≤ 400	≥ 100
Klasa 2	150 < O ₉₀ ≤ 250	≥ 100
Klasa 3	100 < O ₉₀ ≤ 150	≥ 75
Klasa 4	75 < O ₉₀ ≤ 100	≥ 50
Klasa 5	< 75	≥ 30
¹ Wartość średnia dla serii mierzona zgodnie z BS 6906:Part 2:1989		
² Wartość średnia dla serii mierzona zgodnie z BS 6906:Part 3:1989		

Sposób powiązania klas właściwości hydraulicznych w zależności od drenowanego gruntu przedstawia tablica 21.

Tablica 21. Zastosowanie klas właściwości hydraulicznych w zależności od drenowanego gruntu [16, 31]

Rodzaj gruntu	Numer klasy geotekstyliów
1. Grunty piaszczyste [BS 5930:1981]	numer klasy dostosowany do $d_{15} \leq O_{90} \leq d_{85}$
2. Przeważające grunty drobne [BS 5930:1981] - o wskaźniku plastyczności < 10% - o wskaźniku plastyczności ≥ 10%	numer klasy dostosowany do $d_{15} \leq O_{90} \leq d_{85}$ $0,05 \leq O_{90} \leq 0,20$
d_{15} , d_{85} odnoszą się do odpowiednich frakcji kruszywa drenażowego gruntu	

Tablica 22. Cechy geotekstyliów filtrujących [66, SN 640 552:2002]

Grunt otaczający	Wymiar porów geosyntetyku [mm]		Przepuszczalność prostopadła k_{gtx} [m/s]
	min.	max.	
piaski, żwiry	0,05	d_{85} (0,5)	min. 10^{-4}
grunty pylaste	0,05	d_{85} (0,2)	min. 10^{-5}
gliny i iły	0,05	d_{85} (0,5)	min. 10^{-6}
grunty o silnie nierównomiernym uziarnieniu i dużej przepuszczalności $k > 10^{-5}$ m/s	0,05 lub $4 \cdot d_{15}$	$5 \cdot d_{10} \cdot \sqrt{U}$ lub d_{85} miarodajna mniejsza wartość	min $10 \cdot k_{gruntu}$
d_{10} , d_{15} , d_{85} - wielkość ziaren gruntu, które wraz z mniejszymi stanowią odpowiednio 10, 15 i 85 % masy gruntu.			

Tablica 23. Cechy mechaniczne geotekstyliów filtrujących [66, SN 640 552:2002]

Materiał filtracyjny	Wytrzymałość na rozciąganie [kN/m]	Iloczyn wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia [kN/m x %]	Odporność na przebicie dynamiczne [mm]
Żwir ≤ 150 mm	min. 6,0	min. 180	max. 40
Kruszywo łamane ≤ 150 mm	min. 8,0	min. 240	max. 35

Norma szwajcarska SN 640 552a:1997 zaleca, aby wodoprzepuszczalność geotekstyliów stosowanych jako filtr w systemach drenażowych była co najmniej stukrotnie większa od wodoprzepuszczalności gruntu (k_g) [66]:

$$k_{gtx} > 100 k_g$$

W przypadku gliniastych lub pylastych żwirów przepuszczalność może być tylko dziesięciokrotnie większa niż przepuszczalność gruntu [66]. Wymagania dla geotekstyliów filtrujących według SN 640 552a:1997 przedstawia tablica 22. W normie SN 640 552a:1997 podano również wymagania wytrzymałościowe dla geotekstyliów filtracyjnych (tablica 23).

B. Projektowanie drenaży wg [29]

Dane wejściowe

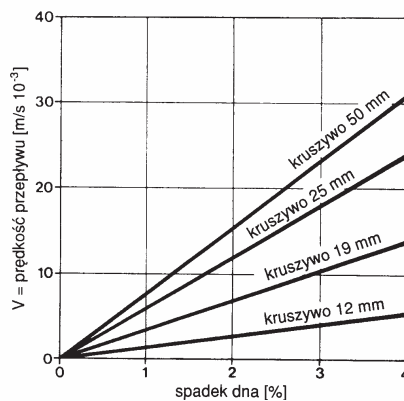
Przed rozpoczęciem projektowania należy określić:

- Właściwości gruntu
Niezbędna jest krzywa uziarnienia otaczającego dren gruntu, który ma być filtrowany.
- Wodoprzepuszczalność gruntu
Miarą przepuszczalności gruntu jest współczynnik filtracji k_s , podawany w m/s.
- Wydatek drenu
Potrzebny jest wymagany wydatek drenu Q [m³/s] w najczęściej występujących warunkach.

DRENY FRANCUSKIE

Wydatek drenu

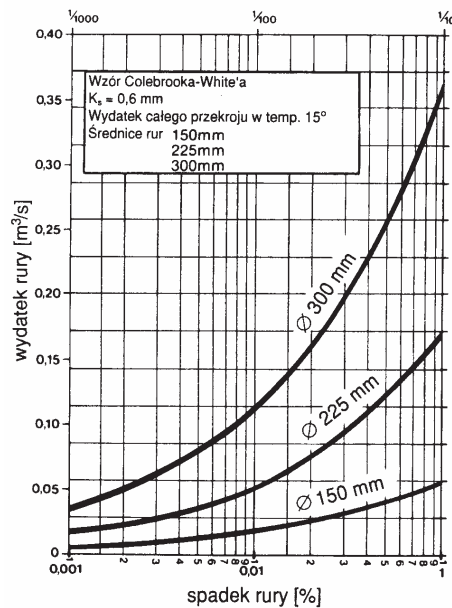
Dla ośrodka drenującego zawierającego tylko ziarna jednego wymiaru, prędkość przepływu v [m/s] zależy od uziarnienia kruszywa i spadku hydraulicznego. Można wyznaczyć ją z rys. 37.



Rys. 37. Zależność prędkości przepływu wody od spadku hydraulicznego dla kruszyw o różnym uziarnieniu [29]

Potrzebny wydatek drenu Q [m³/s] podzielony przez prędkość v [m/s] da potrzebną powierzchnię przekroju drenu.

Jeżeli użyta będzie rurka drenarska, jej średnicę można wyznaczyć się z rys. 38 dla znanego spadku hydraulicznego i potrzebnego wydatku drenu.



Rys. 38. Nomogram do wyznaczania średnicy rurki drenarskiej dla znanego spadku hydraulicznego i potrzebnego wydatku drenu [29]

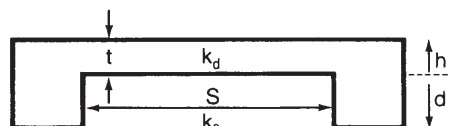
Głębokość drenu

W przypadku dwóch poziomych drenów służących do przejścia wód opadowych i zapobieżenia podnoszeniu się zwierciadła wody pomiędzy nimi ponad pierwotny poziom gruntu, potrzebna głębokość drenów jest określana wzorem:

$$D = \frac{1}{2} S \left(\sqrt{e / k_s + \left(\frac{eL}{bV} \right)^2} \right)$$

gdzie: D - głębokość drenu,
 S - odległość między drenami [m],
 e - intensywność opadu [m/s],
 k_s - współczynnik wodoprzepuszczalności gruntu [m/s],
 b - szerokość drenu [m],
 V - wyznaczona prędkość przepływu [m/s],
 L - długość drenu [m].

Grubość poziomej warstwy drenującej



Rys. 39. Schemat do obliczenia grubości poziomej warstwy drenującej [29]

- dla przepływu w górę z artezyjskiej warstwy wodonośnej wyznaczamy grubość poziomej warstwy drenującej:

$$t = \frac{1}{2} S \sqrt{\frac{k_s h}{k_d d}}$$

gdzie: h - różnica ciśnień wyrażona wysokością słupa wody [m],

d - głębokość do warstwy wodonośnej;

- dla przepływu w dół wód opadowych minimalna grubość warstwy poziomej wynosi:

$$t = \frac{1}{2} S \sqrt{e / k_d}$$

gdzie: e - intensywność opadu atmosferycznego [m/s].

Maksymalny dopływ z warstwy drenującej do drenu na 1 m jego długości wynosi:

$$Q = 2 t^2 k_d / S$$

Każdy z drenów powinien być zdolny do przejścia tego przepływu.

DRENY ŻEBROWE

Rurkę drenarską i głębokość drenu dobiera się tak, jak w przypadku drenów francuskich.

Wydatek rdzenia drenu

W systemie tym zawsze stosuje się rurkę drenarską w drenach poziomych, a więc wymagany maksymalny wydatek rdzenia wynosi:

$$Q = 2 d k_s \quad [\text{m}^3/\text{s}] \text{ na 1 m długości drenu}$$

gdzie: k_s - współczynnik filtracji gruntu [m/s]

- dla drenu odcinającego, do którego jest dopływ tylko z jednej strony

$$Q = d k_s \quad [\text{m}^3/\text{s}].$$

Dla poziomej warstwy drenującej, przejmującej dopływ skierowany do góry, wymagany wydatek wynosi

$$Q = \frac{S k_s h}{2d} \quad [\text{m}^3/\text{s}],$$

- dla poziomej warstwy drenującej, przejmującej wody opadowe, wymagany wydatek wynosi

$$Q = 0,5 S e \quad [\text{m}^3/\text{s}],$$

- dla systemu połączonego wymagany wydatek wynosi

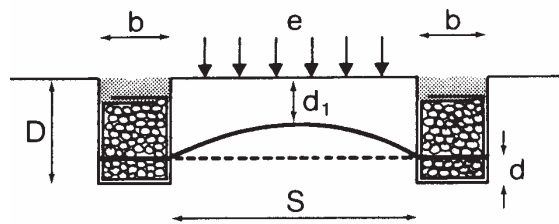
$$Q = 0,5 S (e + k_s h/d) \quad [m^3/s].$$

Należy sprawdzić osiągalny wydatek drenu przy przewidywanym parciu otaczającego gruntu.

C. Przykłady zastosowań [29]

Dreny francuskie

Dreny poziome (typu francuskiego), z rurką lub bez rurki drenażowej, znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie i w rolnictwie. Dwa częste rodzaje ich użycia to obniżenie wysokiego zwierciadła wody gruntowej i redukcja napływu pionowego w warunkach występowania wód artezyjskich. Obniżenie poziomu wód gruntowych można uzyskać pomiędzy dwoma równoległymi drenami o rozstawie S , pokazanymi na rys. 40.



Rys. 40. Równoległe dreny francuskie [29]

Jeżeli zasoby wody gruntowej nie zostaną ponownie odtworzone, to prawie każdy system drenażu doprowadzi w końcu do obniżenia jej zwierciadła. Jednakże każdy odsłonięty teren będzie zasilany przez deszcz i inne opady. Aby dreny typu francuskiego były skuteczne, powinny być zdolne do przyjęcia określonego przepływu, aby zapobiec podniesieniu się zwierciadła wody gruntowej.

Dla drenów w rozstawie S (rys. 40) natężenie przepływu na metr długości drenu wyniesie

$$Q = 0,5 e S \quad [m^3/s]$$

gdzie e oznacza natężenie opadu w m/s.

Część zagłębienia drenu d potrzebną do przejścia napływu można wyznaczyć, korzystając z krzywych zależności prędkości V od spadku drenu (Rys. 37). Całkowita głębokość drenu D jest ustalana tak, aby dać wymagane obniżenie zwierciadła d_1 :

$$d_1 = D - \left(\sqrt{d^2 + \frac{e}{k_s} \left(\frac{S}{2} \right)^2} \right)$$

Ogólnie przyjmuje się obniżenie $d_1 = 0$, zatem

$$D = \frac{1}{2} S \left(\sqrt{e / k_s + \left(\frac{2d}{S} \right)^2} \right)$$

Wyrażenie to dla drenu o szerokości b można przedstawić jako

$$D = \frac{1}{2} S \left(\sqrt{e / k_s + \left(\frac{e}{bV} \right)^2} \right)$$

gdzie V - prędkość przepływu [m/s] (wyznaczona z rys. 37)

Poziome warstwy drenażowe

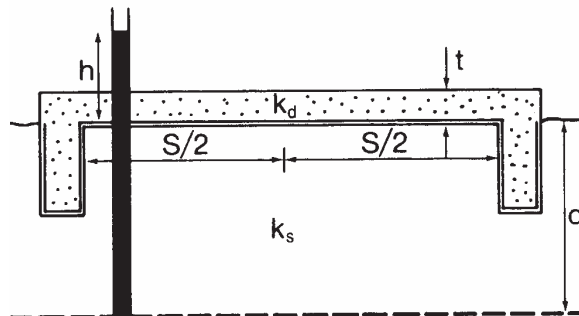
Poziome warstwy drenażowe są często stosowane do przejścia napływu pionowego. Jest to albo przepływ skierowany do góry z warstwy artezyjskiej lub źródła, albo też skierowany w dół przepływ wód opadowych. Chociaż przepływ pionowy jest przejmowany przez warstwę poziomą, przepływ ten jest odprowadzany przez dren typu francuskiego. Na rys. 41 przedstawiono poziomą warstwę drenażową o grubości t i przepuszczalności k_d , położoną w gruncie o współczynniku filtracji k_s . Nadwyżka ciśnienia artezyjskiego wynosi h , a skierowany w górę gradient hydrauliczny wynosi $i = h/d$. Nadwyżka ciśnienia powoduje przepływ wody w górę o natężeniu q [m³/s/m²] wynoszącym:

$$q = \frac{k_s h}{d}$$

Woda wpływa do warstwy drenażowej, z której jest odprowadzana poziomo do drenów. Miąższość warstwy poziomej t powinna być wystarczająca do przejścia całego przepływu pionowego. Jeżeli jest spełniony warunek:

$$t = \frac{1}{2} S \sqrt{q / k_d}$$

to poziom wody nie wzniesie się wyżej niż t ponad powierzchnię podłoża.



Rys. 41. Pozioma warstwa drenażowa [29]

Ponieważ natężenie przepływu w warstwie drenażowej jest znane, miąższość jej wnosi:

$$t = \frac{1}{2} S \sqrt{\frac{k_s h}{k_d d}}$$

Podobne zależności można zapisać dla przejmowania infiltrujących wód opadowych. W tym przypadku natężenie napływu q jest równe natężeniu infiltracji e , a potrzebna miąższość warstwy drenującej wynosi:

$$t = \frac{1}{2} S \sqrt{e / k_d}$$

Natężenie przepływu z poziomej warstwy drenującej osiąga wartość maksymalną:

$$Q = 2 t^2 k_d / S$$

W celu przejścia zarówno wód opadowych, jak i przepływu skierowanego w górę, każdy z drenów powinien być zdolny do przejścia tego wydatku.