# Zasady projektowania warstw uszczelniających z zastosowaniem geomembran w obiektach typu składowiska, wylewiska, zbiorniki. Warunki techniczne wykonania i odbioru oraz podstawowe obliczenia statyczne.

**Opracował: Piotr Jermołowicz**
**tel/fax 091 4607140**
**tel. kom. 501 293 746**
**e-mail : p.jermolowicz@wp.pl**

**Toruń, 13.06.2013 r.**
**Bydgoszcz, 14.06.2013 r.**

# CZĘŚĆ I

# Zasady projektowania warstw uszczelnień z zastosowaniem geomembran w obiektach typu składowiska, wylewiska i zbiorniki. Podstawowe obliczenia statyczne.

## Wstęp

Przygotowany przeze mnie materiał jest podsumowaniem moich 25 – letnich doświadczeń w tej dziedzinie i stanowi kompendium wiedzy przedstawione całościowo.
Składowiska, wylewiska i różnego rodzaju zbiorniki są budowlami inżynierskimi szczególnego znaczenia ze względu na koncentrację szkodliwych substancji i odpadów na stosunkowo niewielkiej powierzchni.
W związku z powyższym muszą być projektowane, wykonywane i odbierane według najnowszych zasad sztuki inżynierskiej i zgodnie z obowiązującymi przepisami.
Szczególnie istotna jest ochrona gruntów i wód gruntowych pod składowiskami, wylewiskami i zbiornikami oraz w rejonie ich lokalizacji przed migracją szkodliwych zanieczyszczeń i odcieków.
Jeszcze do połowy lat 80 ubiegłego wieku wysypiska i składowiska lokalizowano w wyeksploatowanych wyrobiskach piasku i żwiru.
Tylko w sporadycznych przypadkach podłoża gruntowe były uszczelnione ( naturalnie lub sztucznie ) poprzez :

- istnienie warstwy gliny lub iłów,
- zastosowanie cienkiej folii np. ogrodniczej (PP,PCV,PE ) o grubości 0,2 – 0,3 mm,
- wykładanie niecki zużytymi opakowaniami po nawozach !

Tego typu działania musiały w końcu doprowadzić do zanieczyszczenia wód podziemnych powierzchniowych oraz gruntów. Z wielu analiz wynikało, że wody ujmowane na potrzeby nawet przemysłowe wykazywały znaczne przekroczenie stężenia dopuszczalnych zanieczyszczeń z najbardziej uciążliwym rodzajem w postaci pierwiastków metali ciężkich (cynk, kadm, nikiel i ołów).
Ten stan trwał do 1989 roku. W wyniku reformy samorządowej ustalono, że podstawową jednostką gospodarki odpadami jest gmina. Zaczęto wdrażać uszczelnienia w postaci różnego rodzaju folii dostępnych na polskim rynku.

## 1. Rys historyczny.

Z perspektywy czasu należy stwierdzić, że w dziedzinie geomembran zmieniło się wiele. Po trudnych początkach wdrażania systemów z uszczelnieniami geomembranowymi, ta bardzo ważna dziedzina budownictwa była pozostawiona sama sobie do roku 1997. Dopiero wtedy ukazuje się norma PN-B-10290 „ Ogólne wymagania dotyczące wykonawstwa geomembran w budowie składowisk odpadów stałych ”.
Brak konsekwentnych działań legislacyjnych instytucji do tego powołanych ( PKN, ITB, IBDiM itp. ) począwszy od pierwszych zastosowań geomembran, tj od 1989 r. powodowało nieporozumienia wśród wykonawców tych robót, a także pozostałych uczestników procesu inwestycyjnego z inwestorami zastępczymi, inspektorami nadzoru i kierownikami budów na czele.
O skutkach tych zaniechań będzie można przekonać się dopiero za kilkanaście lat, kiedy zaczną pojawiać się sygnały o ujawnionych nieszczelnościach wykonanych wcześniej warstw uszczelnień różnego rodzaju składowisk, wylewisk i zbiorników.

Norma opracowana w 1997 r przez PKN i jej Normalizacyjną Komisję Problemową Nr 142 ds. geosyntetyków stworzyła czytelne podstawy jako system dla kontroli i odbioru robót uszczelnieniowych [17].
System taki działa już od dawna w krajach zachodnich i doskonale zdaje egzamin do dziś. Był on niechętnie przyjęty przez naszych rodzimych wykonawców.
W tym też czasie zakończony został swoistego rodzaju dyktat ze strony firm instalujących geomembrany. Wynikał on przede wszystkim z braku dostatecznej wiedzy w tej dziedzinie zarówno wśród projektantów jak i nadzoru budowlanego.
Następny etap polegający na wdrożeniu wewnętrznego systemu kontroli jakości przyszedł dopiero po 2003 roku dla firm, które chciały nadal liczyć się na rynku wykonawców.

## 2. Podstawowe regulacje prawne w zakresie lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięć składowisk odpadów.

Od 1989 roku zmieniło się bardzo wiele rozwiązań prawnych dotyczących gospodarki odpadowej i ochrony środowiska. Zmiany dotyczą również mentalności i zachowań społeczeństwa. W 2003 roku zostało wydane rozporządzenie ministra środowiska w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk z późniejszymi zmianami. Rozporządzenie to było konsekwencją zapisu w ustawie o odpadach z 2001 r. oraz koniecznością dostosowania prawa polskiego do Prawa Unii Europejskiej.
Zgodnie z § 5 ww. rozporządzenia należy :

1. *składowisko odpadów lokalizuje się tak aby, miało naturalną barierę geologiczną, uszczelniającą podłoże i ściany boczne.*
2. *Minimalna miąższość i wartość współczynnika filtracji k naturalnej bariery geologicznej wynosi :*
   1) *dla składowiska odpadów niebezpiecznych – miąższość nie mniejsza niż 5 m, współczynnik filtracji* $k \leq 1{,}0 \times 10^{-9}$ *m/s;*
   2) *dla składowiska odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne – miąższość nie mniejsza niż 1m, współczynnik filtracji* $k \leq 1{,}0 \times 10^{-9}$ *m/s.*
3. *Bariera geologiczna powinna mieć rozciągłość poziomą przekraczającą obszar projektowanego składowiska odpadów.*
4. *Przewidywany najwyższy piezometryczny poziom wód podziemnych powinien być co najmniej 1m poniżej poziomu projektowanego wykopu dna składowiska.*
5. *W miejscach, gdzie naturalna bariera geologiczna nie spełnia warunków określonego w ust. 2-4, stosuje się sztucznie wykonaną barierę geologiczną o minimalnej miąższości 0,5 m, zapewniającą przepuszczalność nie większą niż określona w ust. 2, którą wykonuje się w taki sposób, by procesy osiadania na składowisku odpadów nie mogły spowodować jej zniszczenia.*
6. *Pomiary współczynnika filtracji k naturalnej lub sztucznej bariery geologicznej wykonuje się co najmniej dwiema metodami, w tym minimum jedną polową, zależnie od warunków geologiczno – inżynierskich.*
7. *Uzupełnieniem naturalnej lub sztucznej bariery geologicznej jest izolacja syntetyczna, zaprojektowana w sposób uwzględniający skład chemiczny odpadów i warunki geotechniczne składowania; izolacja syntetyczna nie może stanowić elementu stabilizacji zboczy składowiska.*

Należy pamiętać, że podstawowym problemem w konstrukcji tego rodzaju rozporządzenia jest osiągnięcie odpowiedniego poziomu szczegółowości zapisów. Lokalizacja, konstrukcja i eksploatacja składowiska zależą od bardzo wielu zmiennych, tj. od rodzaju i ilości składowanych odpadów oraz od lokalnych warunków hydrologicznych i geologicznych. W związku z tym liczba możliwych rozwiązań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych jest ogromna. Praktycznie niewykonalne jest więc przygotowanie bardzo szczegółowych warunków budowy i eksploatacji składowiska. Dane te powinny zostać opracowane w projekcie budowlanym oraz w instrukcji eksploatacji składowiska. Rozporządzenie powinno natomiast wskazać wszystkie elementy, które projektant musi uwzględnić w projekcie.

## 3. Geosyntetyki stosowane w uszczelnieniach.

W trakcie budowy składowisk, wylewisk i zbiorników stosowane są różnego rodzaju geosyntetyki :

- przepuszczalne – geowłókniny, geotkaniny, geosiatki i georuszty,
- nieprzepuszczalne – geomembrany i bentomaty lub geokompozyty.

Obowiązuje tu norma PN – EN 13257 : 2002 – Geotekstylia i wyroby pokrewne. Właściwości wymagane przy stosowaniu w budownictwie składowisk odpadów stałych.

### 3.1 Geomembrany

Geomembrany są jednym z głównych elementów konstruowania systemu uszczelnienia składowisk i wylewisk.

*Geomembrana: syntetyczna wykładzina o bardzo niskiej przepuszczalności stosowana jako bariera uszczelniająca, współpracująca bezpośrednio z gruntem w celu ograniczenia migracji zanieczyszczeń w formie płynnej lub gazowej.*

Geomembrany są wykonywane ze stosunkowo cienkich i ciągłych arkuszy polimerowych, ale mogą również powstawać w wyniku impregnacji geotekstyliów masą asfaltową lub elastomerową lub przybrać postać wielowarstwowych geokompozytów bitumicznych.
Geomembrany polimerowe nie są całkowicie nieprzepuszczalne (właściwie o żadnym materiale nie można tego powiedzieć), ale są stosunkowo słabo przepuszczalne w porównaniu z geotekstyliami czy z gruntem, a nawet gliną i iłem. Typowe wartości przepuszczalności geomembran mierzone badaniami przenikalności pary wodnej mieszczą się w zakresie od $1 \times 10^{-12}$ do $1 \times 10^{-15}$ m/s, czyli są o trzy do sześciu rzędów wielkości mniejsze niż w przypadku typowych bentomat.
Opracowywane są obecnie coraz to nowsze zastosowania, co bezpośrednio rzutuje na poziom sprzedaży. Geomembrany stanowią obecnie największy segment rynku geosyntetyków, jeżeli chodzi o sprzedaż produktów.
Ogromna większość geomembran to stosunkowo cienkie arkusze sprężystych termoplastycznych materiałów polimerowych.
Obecnie stosowane geomembrany :

**Powszechnie stosowane:**

- Polietylen o dużej gęstości (HDPE)
- Liniowy polietylen o niskiej gęstości (LLDPE)
- Polichlorek winylu (PVC )
- Polipropylen ( PP )

- **Rzadziej stosowane:**
- Elastyczny polipropylen: niezbrojony (fPP) i zbrojony (fPP-R)
- Polietylen chlorosulfonowany zbrojony (CSPE-R)
- Terpolimer etylen-propylen-dien niezbrojony (EPDM) i zbrojony (EPDM-R)
- Etylenowy stop polimerowy zbrojony (EIA-R)

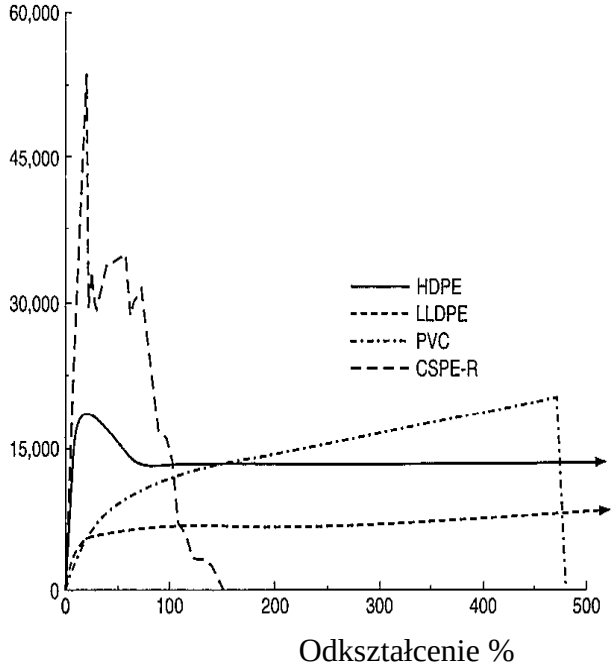
Dla geomembran używanych jako uszczelnienia wykonuje się szereg badań właściwości
- fizycznych : grubość, gęstość, masa jednostkowa, przepuszczalność pary wodnej, wskaźnik płynięcia
- chemicznych : badania odporności na związki i substancje chemiczne, również odcieki, pęcznienie, utlenianie, promieniowanie UV
- biologicznych : odporność na zagrzybienie , bakterie i gryzonie
- termicznych : odporność na wielokrotne wahania temperatur, współczynnik
- liniowej rozszerzalności i skurczu
- mechanicznych : wytrzymałość na przebicie, rozdzieranie, rozciąganie, tarcie

Poniżej przedstawiono niektóre wielkości fizyczne stosowanych geomembran :

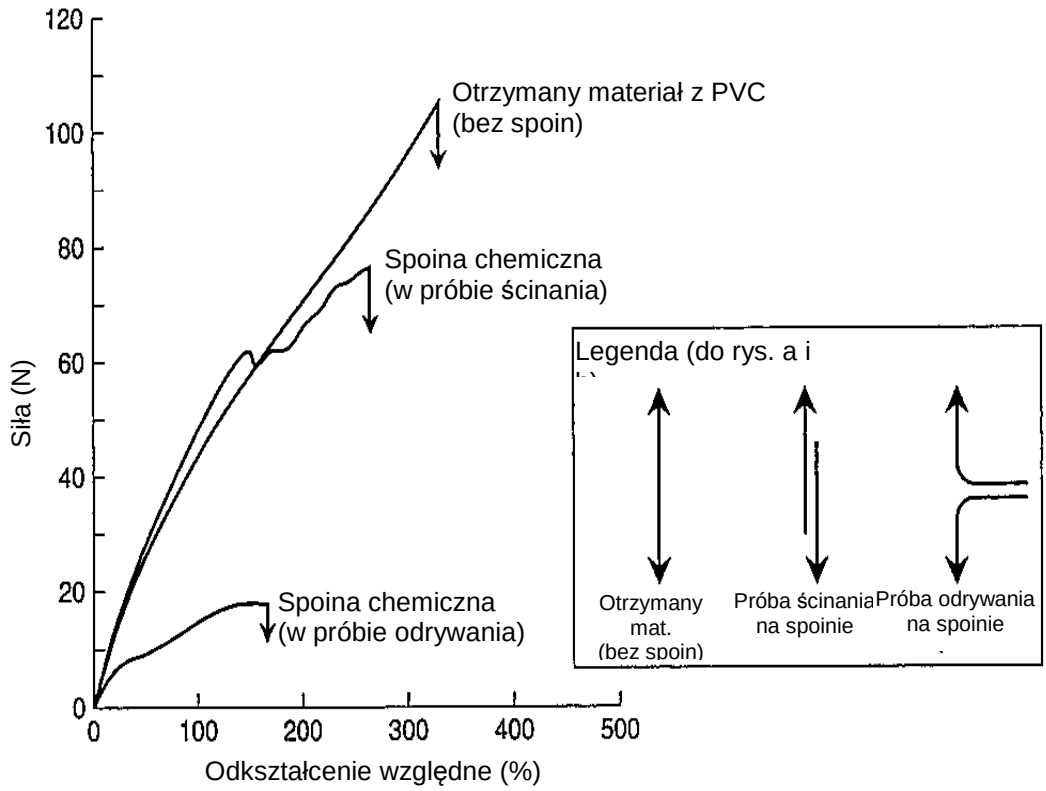
Tab. 1 Wartości przenikalności pary wodnej [10]

| Polimer, z którego wykonana jest geomembrana | Grubość (mm) | WVT (g/m$^2$-doba)* | WVT (perm-cm) |
|---|---|---|---|
| PVC | 0,28 | 4,4 | 1,2 x $10^{-2}$ |
| | 0,52 | 2,9 | 1,4 x $10^{-2}$ |
| | 0,75 | 1,8 | 1,3 x $10^{-2}$ |
| CSPE-R | 0,89 | 0,44 | 0,84 x $10^{-2}$ |
| EPDM-R | 0,51 | 0,27 | 0,13 x $10^{-2}$ |
| | 1,23 | 0,31 | 0,37 x $10^{-2}$ |
| HDPE | 0,80 | 0,017 | 0,013 x $10^{-2}$ |
| | 2,44 | 0,006 | 0,014 x $10^{-2}$ |

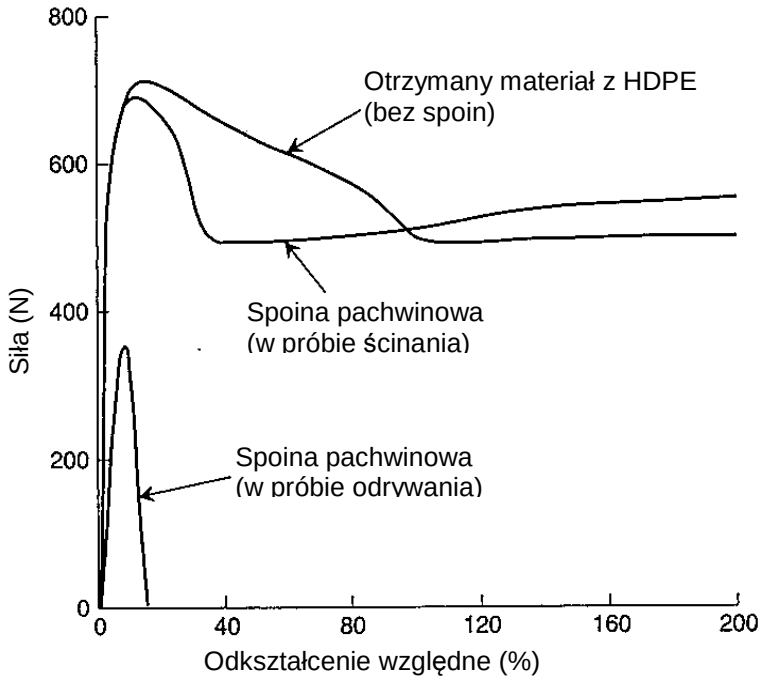
*1,0 g/m$^2$-doba = 10,0 l/ha-doba



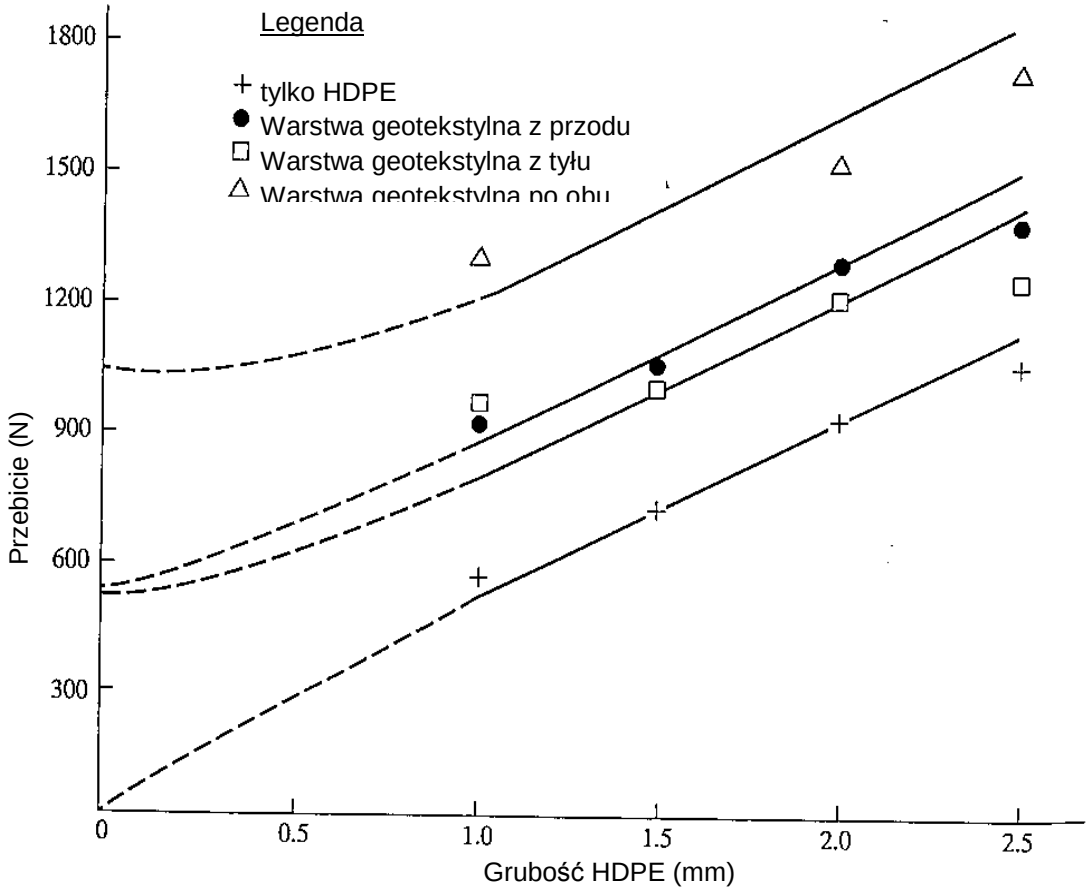

Rys.1. Wyniki z próby rozciągania dla różnych próbek geomembran. [21]




Rys.2. Wyniki rozciągania dla geomembrany PCV wraz z spoinami




Rys.3. Wyniki prób rozciągania dla geomembrany HDPE wraz z spoinami




Rys.4. Wyniki badania przebicia geomembrany HDPE w różnych kombinacjach z geowłókniną o gramaturze 400 g/m$^2$ [10]

Tab.2. Wartości tarcia i sprawności dla różnych kontaktów geomembrany z geosyntetykami. [10, 15]

**(a) Kąty tarcia gruntu względem geomembrany**

| Geomembrana | Rodzaj gruntu | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | piasek betonowy (φ = 30°) | | piasek ottawski (φ = 28°) | | piasek łyszczykowy (φ = 26°) | |
| HDPE | | | | | | |
| Uszorstniona | 30° | (100%) | 26° | (92%) | 22° | (83%) |
| Gładka | 18° | (56%) | 18° | (61%) | 17° | (63%) |
| PVC | | | | | | |
| Szorstka | 27° | (88%) | - | - | 25° | (96%) |
| Gładka | 25° | (81%) | - | - | 21° | (79%) |
| CSPE-R | 25° | (81%) | 21° | (72%) | 23° | (87%) |

**(b) Kąty tarcia geomembrany o geotekstylia**

| Geotekstylia | Geomembrana | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | HDPE | | PVC | | CSPE-R |
| | Uszorstniona | Gładka | Szorstka | Gładka | Falista |
| Geowłóknina igłowana | 32° | 8° | 23° | 21° | 15° |
| Geowłóknina zgrzewana | 28° | 11° | 20° | 18° | 21° |
| Geotkanina | 19° | 6° | 11° | 10° | 9° |
| monofilamentowa | 32° | 10° | 28° | 24° | 13° |
| Geotkanina z ciętej folii | | | | | |

**(c) Kąty tarcia gruntu względem geotekstyliów**

| Geotekstylia | Rodzaj gruntu | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | piasek betonowy (φ = 30°) | | piasek ottawski (φ = 28°) | | piasek łyszczykowy (φ = 26°) | |
| Geowłóknina igłowana | 30° | (100%) | 26° | (92%) | 25° | (96%) |
| Geowłóknina zgrzewana | 26° | (84%) | - | - | - | - |
| Geotkanina monofilamentowa | 26° | (84%) | - | - | - | - |
| Geotkanina z ciętej folii | 24° | (77%) | 24° | (84%) | 23° | (87%) |

*Procent sprawności (w nawiasach) wynika ze wzorów :

$$E_C = (c_a / c) \times 100$$

$$E_\phi = (\tan\delta / \tan\phi) \times 100$$

Tab.3. Ogólna odporność chemiczna geomembran. [14]

| Substancja chemiczna | Rodzaj geomembrany | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | HDPE | | PVC | | CSPE-R | | EPDM-R | |
| | 38 °C | 70 °C | 38 °C | 70 °C | 38 °C | 70 °C | 38 °C | 70 °C |
| **Ogólne** | | | | | | | | |
| Węglowodory alifatyczne | ✓ | ✓ | | | | | | |
| Węglowodory aromatyczne | ✓ | ✓ | | | | | | |
| Rozpuszczalniki chlorowane | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | |
| Rozpuszczalniki tlenowe | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | ✓ |
| Rozpuszczalniki naftowe | ✓ | ✓ | | | | | | |
| Alkohole | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ |
| **Kwasy** | | | | | | | | |
| Organiczne | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Nieorganiczne | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| **Metale ciężkie** | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| **Sole** | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |

skrót: ✓ = ogólnie dobra odporność

Tab.4. Współczynniki rozszerzalności/kurczliwości cieplnej dla różnych polimerów.

| Typ polimeru | Rozszerzalność / kurczliwość cieplna (x $10^{-5}$/°C) |
|---|---|
| Polietylen | |
| Duża gęstość | 11-13 |
| Średnia gęstość | 14-16 |
| Mała gęstość | 10-12 |
| Liniowy mała gęstość | 15-25 |
| Polipropylen | 5-9 |
| Polichlorek winylu | |
| Nieplastyfikowany (np. rura) | 5-10 |
| Plastyfikowany (np. geomembrana) | 7-25 |
| Poliamid | |
| Nylon 6 | 7-9 |
| Nylon 66 | 7-9 |
| Polistyren | 3-7 |
| Poliester | 5-9 |

Żaden z powyższych parametrów nie występuje osobno. Z reguły występuje synergia. Ocena tych zjawisk w połączeniu w całość stanowi istotę programowania trwałości konstrukcji.

### 3.2. Podsumowanie

Analizując powyższe wyniki badań oraz zestawienia parametrów należy podkreślić, że tylko geomembrany HDPE spełniają wszystkie kryteria i stąd ich popularność praktycznie w każdym projekcie.

Należy tu dodać uwagę dotyczącą gęstości geomembran z HDPE. Klasyfikacja według ASTM dla granulatu HDPE wymaga gęstości równej lub większej niż 0,941 mg/l. Jednak do produkcji dostępnych na rynku geomembran z HDPE stosuje się granulaty

polietylenowe o gęstości od 0,934 do 0,938 mg/l. Granulat mieści się więc w zasadzie w zakresie przewidzianym dla polietylenu o średniej gęstości (MDPE). Po dodaniu sadzy i domieszek gęstość mieszaniny wzrasta do 0,941 mg/l. A więc to, co producenci geomembran uznają za HDPE jest właściwie dla producenta granulatu tworzywem MDPE.

## 4. Trwałość geomembran.

Geomembrany HDPE są produkowane z wysokogęstościowego polietylenu na bazie granulatu. W skład tworzywa wchodzi 97,5 % polimeru i 2,5 % stabilizatorów ( czarny węgiel – sadza, antyutleniacze i stabilizatory cieplne ). Materiał ten produkowany jest w postaci pasm o szerokości 2,0 – 10,5 m i długości w beli 100 – 200 mb. Grubość jako trzeci wymiar zawiera się w granicach 0,5 – 3 mm. Aby przedstawione w tym opracowaniu metody wymiarowania dawały pożądane rezultaty, geomembrana musi być odpowiednio pakowana, przewożona, przeładowywana oraz instalowana.
Do najważniejszych zmiennych mających wpływ na daną sytuację należą:

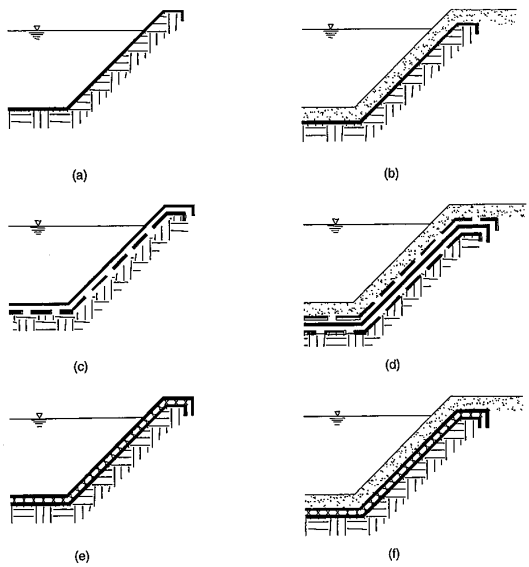
- Załadunek w zakładzie produkcyjnym
- Przewóz z fabryki na budowę
- Rozładunek na budowie
- Warunki przechowywania na budowie
- Ekstrema temperatury na budowie
- Warunki podłoża na budowie
- Rozłożenie w pobliżu miejsca instalacji
- Przeniesienie w miejsce wykonania spoin
- Postępowanie podczas wykonywania spoin
- Narażenie na warunki atmosferyczne po wykonaniu spoin
- Wykonanie zasypki lub obsypki na gotowej geomembranie

Należy zauważyć, że każdy z tych czynników jest raczej poza kontrolą projektanta. Geomembrana zachowa swoją trwałość do tego stopnia, by funkcjonować zgodnie z projektem tylko pod warunkiem, że specyfikacje będą odpowiednio surowe, opracowany zostanie odpowiedni dokument zapewnienia jakości na budowie, kompetentny personel zapewnienia jakości będzie prowadził kontrolę w pełnym wymiarze godzin, a podwykonawca odpowiedzialny za instalację geomembrany będzie odpowiednio współpracować.
Przy spełnieniu tych warunków można śmiało założyć trwałość geomembrany jako okres połowicznej utraty właściwości wynoszący ok. 550 lat. Jednak należy pamiętać, że temperatury przekraczające $20^0$ C powodują wykładnicze skrócenie czasu trwałości.
Przy $40^0$ C programowany czas trwałości tej samej geomembrany wynosi ok. 90 lat. Przy założeniu, że geomembrany znajdują się pod warstwą obsybki, ich trwałość i starzenie się może być bardzo długie.

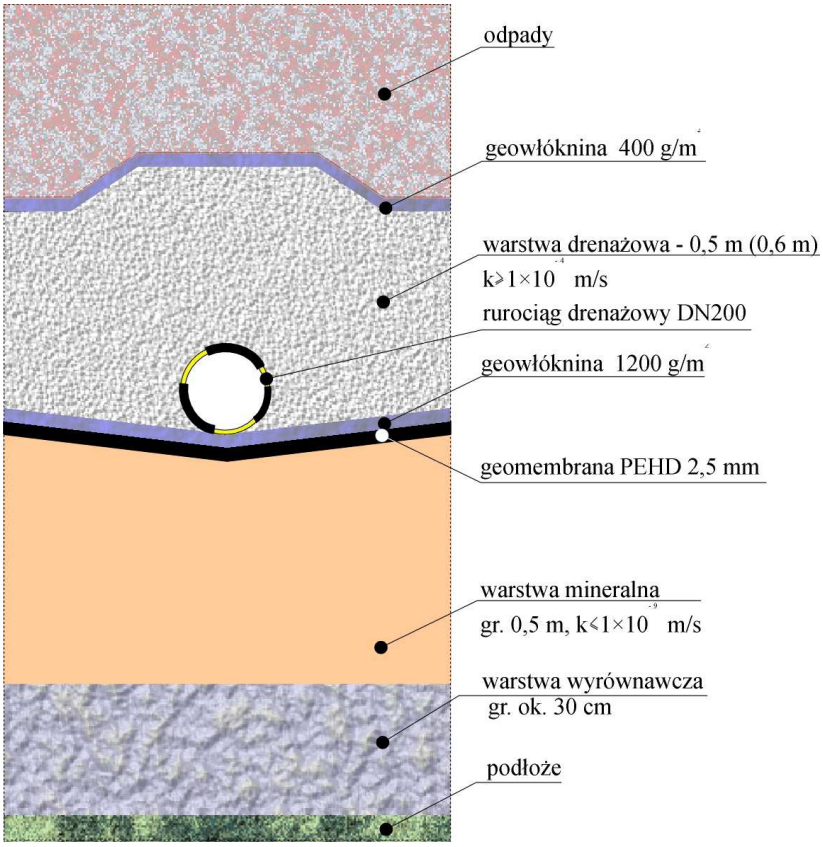
## 5. Projektowanie warstw uszczelnień

Typowe przekroje poprzeczne poszczególnych rodzajów izolacji przedstawiono na poniższych schematach :

Rys.5. Schematy różnych układów warstw uszczelniania obiektów




Oprócz tych podstawowych schematów istnieją liczne alternatywy w postaci bentomat i przesłon mineralnych z iłów. Składowiska i wylewiska są szczególną grupą obiektów, w których zastosowane geosyntetyki powinny podlegać szczególnym reżimom technologicznym. W każdym składowisku tworzona jest szczelna kapsuła z kilku warstw geosyntetycznych pełniących różne funkcje.




Rys.6. Typowy przekrój warstw uszczelnienia składowiska.

Rozmieszczenie poszczególnych warstw uszczelniająco – separacyjnych, szczególnie na skarpach składowiska powinno być poparte odpowiednimi obliczeniami w fazie projektowej.
Obliczeniom powinno być poddane :

- grubość geomembrany ze względu na warunki geometryczne składowiska oraz wysokość składowania odpadów wraz z możliwością osiadania podłoża ( dopuszczalne odkształcenie geomembrany powinno być ok. 50 razy mniejsze niż mierzone podczas rozciągania jednoosiowego w laboratorium ) ,
- sposób zakotwienia na koronie skarpy,
- stateczność warstw geosyntetycznych na skarpach i
- stateczność obsybki filtracyjnej.

Należy podkreślić, że dotychczasowa praktyka projektowa opiera się na quasi metodzie obserwacyjnej czyli projektant przyjmuje rozwiązanie na podstawie dostępnej literatury lub własnych doświadczeń bez jakichkolwiek obliczeń.
Stąd też bierze się najwięcej przypadków wykrytych awarii różnego rodzaju przesłon izolacyjnych związanych z geomembranami.
Statystyka w tym temacie jest bezwzględna :

- błędy projektowe – 25 %
- mechaniczne uszkodzenie w trakcie rozkładania – 70 %
- błędy w trakcie eksploatacji – 5 %

Od ponad 8 lat w obiektach objętych szczególnym dozorem i monitoringiem montowane są różne systemy do wykrywania nieszczelności w geomembranach.
Dzięki tym systemom stwierdzono, że praktycznie na każdym składowisku występują nieszczelności i uszkodzenia, przez które może przechodzić do 100 % odcieku.
W takich przypadkach należy mówić o katastrofie, a nie o awarii, tym bardziej, że nie ma możliwości zatrzymania tego procesu.
Odpowiedzialność za taki stan rzeczy spada na wszystkich uczestników inwestycji, łącznie z inwestorem i śmiało można mówić o bezsensownym wydaniu pieniędzy.
Przyczyną uszkodzenia geomembran mogą być :

- koncentracja naprężeń (geomembrana napięta),
- nadmierne lub nierównomierne osiadanie gruntu,
- miejscowy brak kontaktu między płaszczyzną geomembrany a podłożem ( kawerny ),
- dopuszczanie do składowania odpadów bezpośrednio na geomembranie,
- najechanie lub wbicie lemiesza spycharki lub kompaktora w skarpę,
- samozapłony odpadów lub nieświadome skutków podpalanie szczególnie przy skarpach składowiska,
- dewastacja uszczelnienia poprzez wycięcie określonej płaszczyzny do dalszego wykorzystania gospodarczego przez osoby trzecie,
- nadmierne ilościowo rozwijanie i układanie pasm geomembrany na zakład przy wysokich temperaturach powietrza, pełnym nasłonecznieniu i bez sukcesywnego zgrzewania,
- zgrzewanie geomembran w niskich temperaturach otoczenia ( poniżej $5^0$C) bez utrzymywania temperatury zgrzewania na stałym poziomie w maszynach samojezdnych,
- dopuszczanie do okresowych schłodzeń elementów grzewczych poprzez, np gwałtowne podmuchy zimnego wiatru,
- zgrzewanie pasm geomembrany nieoczyszczonych z błota, piasku oraz podczas deszczu lub mżawki.

Pomimo przedstawionych mankamentów uszczelnień geomembranowych trudno nie docenić ich zalet. Dla uzyskania zamierzonego efektu końcowego jakim jest ochrona gruntów i wód gruntowych przed przedostaniem się substancji toksycznych powinien być zapewniony właściwy system projektowania oraz bezwzględna kontrola wykonawstwa z utrzymaniem pełnego reżimu technologicznego.
Znając niezbędne właściwości geomembran ( szczególnie właściwości mechaniczne ) projektant musi ustalić właściwe schematy obliczeń. Współczynnik bezpieczeństwa F jest definiowany jako iloraz wartości dopuszczalnych do wartości projektowanych dla danego schematu obliczeń.

## 5.1. Wybór rodzaju materiału ( polimeru ).

Jeżeli chodzi o wybór rodzaju polimeru stosowanego do produkcji uszczelnienia, najważniejszą kwestią jest odporność chemiczna na płyn, z którym będzie miała styczność geomembrana. Ponadto odporność chemiczna musi zostać zachowana przez cały okres eksploatacji danego obiektu :

- w przypadku zbiorników z wodą pitną, należy założyć okres eksploatacji wynoszący około 20 lat. Podobnie jest w przypadku ogólnego przechowywania wody do celów rolniczych.

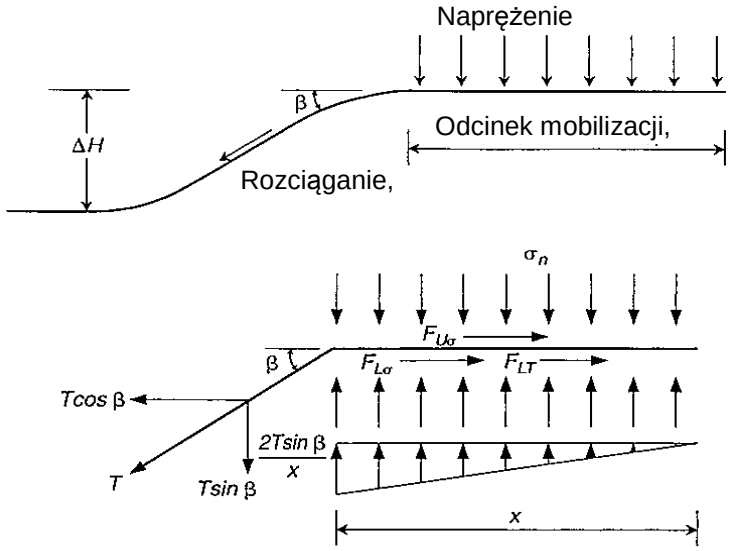
- w przypadku gromadzenia płynów zawierających znane kwasy, zasady, metale ciężkie, sole lub do powszechnie przechowywanych chemikaliów, należy przestudiować kartę odporności chemicznej . Należy pamiętać o tym, że większość producentów oferuje podobne tabele i należy się z nimi również zapoznać. Często zapomina się o sprawie odporności chemicznej spoin na działanie płynu. Jest to szczególnie istotne w przypadku spoin klejonych, a mniej istotne w przypadku spoin zgrzewanych i wytłaczanych.

- w przypadku przechowywania płynów będących mieszankami ścieków przemysłowych – w procesie doboru materiału polimerowego należy wykorzystać najbardziej żrący płyn wchodzący w skład mieszanki, przy założeniu, że pomiędzy różnymi płynami zlewanymi do zbiornika nie zachodzi efekt synergii.

- w przypadku przechowywania niemożliwych do zidentyfikowania płynów (np. z procesów wytwórczych, które są na etapie projektowania i nie są jeszcze stosowane na skalę przemysłową) lub w przypadku odcieków o bardzo niejednorodnym charakterze, należy zachować wielką ostrożność. Ze względu na względną obojętność wobec chemikaliów, często wybiera się wówczas tworzywo HDPE. Spoiny wykonuje się przez zgrzewanie lub spawanie wytłoczne, nie dodając żadnych obcych materiałów. Jest jednak zalecane, a czasem nawet konieczne, by pobrać próbki materiału i przeprowadzić próbę w laboratorium.

## 5.2.Grubość geomembrany.

Istnieje wiele związków doświadczalnych pomiędzy grubością geomembrany a głębokością izolowanego zbiornika. Chociaż grubość geomembrany jest faktycznie związana z działającymi na nią ciśnieniami, to takie wytyczne doświadczalne są zupełnie bezzasadne i zupełnie niezgodne z zasadmi projektowania w oparciu o dane techniczne. Projekt powinien uwzględniać odkształcenie podpowierzchniowe pod uszczelnieniem, które może nastąpić podczas eksploatacji. Takie odkształcenia mogą powstać wskutek działania wielu czynników: nierównomiernego osiadania podłoża, osiadania zasypki pod geomembraną (np. w przypadku wykopów pod rury), miejscowego osiadania wokół podatnych obszarów znajdujących się pod geomembraną ( grunty organiczne ), które mogą doprowadzić do zmiany warunków podłoża oraz wszelkich innych anomalii, które powodują odkształcenie i naprężenie geomembrany.




Rys.7. Schemat obliczeniowy do wyznaczenia grubości geomembrany. [13]

$$T = \sigma_{allow} t$$

gdzie

$T$ = zmobilizowane rozciąganie geomembrany
$\sigma_{allow}$ = dopuszczalne naprężenie geomembrany
$t$ = grubość geomembrany.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$T\cos\beta = F_{U\sigma} + F_{L\sigma} + F_{LT}$$

$$T\cos\beta = \sigma_n \tan\delta_U(x) + \sigma_n \tan\delta_L(x)$$

$$+0{,}5\left(\frac{2T\sin\beta}{x}\right)(x)\tan\delta_L$$

$$T = \frac{\sigma_n x(\tan\delta_U + \tan\delta_L)}{\cos\beta - \sin\beta\tan\delta_L}$$

Przy $T = \sigma_{allow}\, t$, otrzymujemy :

$$t = \frac{\sigma_n x(\tan\delta_U + \tan\delta_L)}{\sigma_{allow}(\cos\beta - \sin\beta\tan\delta_L)}$$

gdzie :

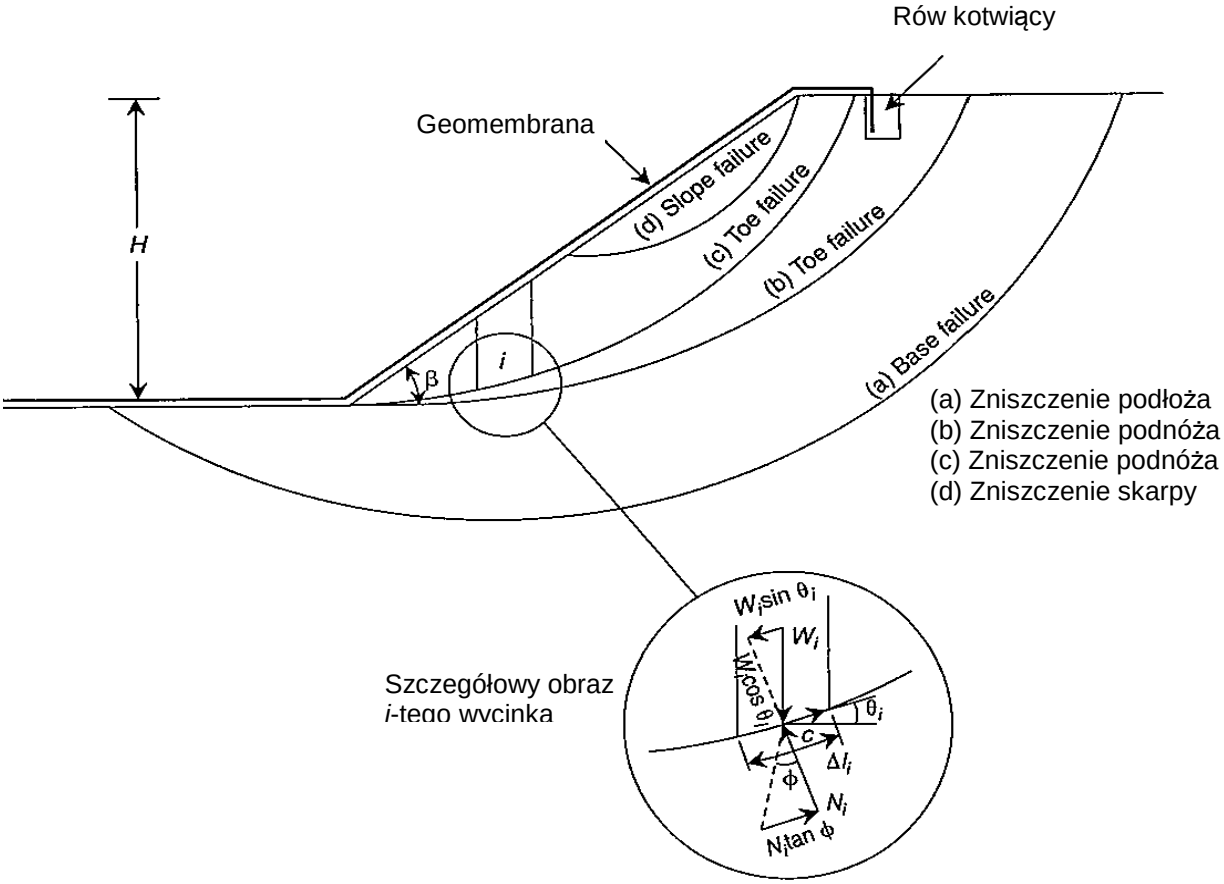
$\beta$ = kąt osiadania mobilizujący rozciągnięcie geomembrany
$F_{U\sigma}$ = siła ścinająca nad geomembraną ze względu na ciśnienie płynu (należy zauważyć, że w przypadku izolacji płynów naprężenie ścinające wynosi zero, w zasadzie tak samo jest nawet jeżeli nad geomembraną znajduje się cienka warstwa obsypki, ponieważ prawdopodobne jest wystąpienie spękań)
$F_{L\sigma}$ = siła ścinająca pod geomembraną ze względu na ciśnienie płynu znajdującego się nad geomembraną (oraz gruntu, jeżeli znajduje się tam również warstwa gruntu)
$F_{LT}$ = siła ścinająca pod geomembraną związana z pionową składową siły $T$
$\sigma_n$ = działające naprężenie związane z zawartością zbiornika
$\delta$ = kąt oporu tarcia pomiędzy geomembraną a przyległym materiałem (np. gruntem lub warstwą geotekstyliów)
$x$ = odcinek mobilizacji odkształcenia geomembrany.

Ogólne zakresy powyższych zmiennych przedstawiają się następująco:

$\sigma_n$ = od 20 do 100 kPa (= od 2 do 10 m płynu),
$\beta$ = od 0 do 60°,
$x$ = od 15 do 100 mm (ustalane na podstawie badań laboratoryjnych ),
$\sigma_{allow}$ = od 6000 do 30000 kPa ,
$\delta_U$ = 0° dla izolacji zbiorników wodnych oraz od 10 do 40° dla izolacji składowisk (ustalane na podstawie badań laboratoryjnych),
$\delta_L$ = od 10 do 40° (ustalane na podstawie badań laboratoryjnych)

## 5.3.Stateczność skarpy,

Rozpatrując ogólną stateczność masywu skarpy pod geomembraną zakłada się zniszczenie po kołowo – walcowych płaszczyznach poślizgu. W analizach powinny być sprawdzone następujące schematy zniszczenia:




Rys.8. Przykłady różnych rodzajów linii poślizgu wewnątrz masywu gruntowego. [13]

$$FS = \sum_{i=1}^{n} \frac{[(W_i \cos\theta_i)\tan\phi + \Delta l_i c]R}{(W_i \sin\theta_i)R}$$

gdzie :

$W_i$ = ciężar *i*-tego wycinka
$\theta_i$ = kąt pomiędzy *i*-tym wycinkiem a poziomem
$\Delta l_i$ = długość łukowa *i*-tego wycinka
$\varphi$ = kąt odporności gruntu na ścinanie
$c$ = kohezja gruntu
$R$ = promień koła zniszczenia
$n$ = liczba użytych wycinków.

Dla linii poślizgu oznaczonych literami c i d należy wprowadzić zmianę. W tym przypadku znaczenia nabiera istnienie uszczelnienia, które dodatkowo jest pokryte warstwą obsypki i tworzy napiętą membranę wzdłuż skarpy aż do rowu kotwiącego znajdującego się w koronie masywu.

W analizie należy uwzględnić wartość siły rozciągającej T :

$$FS = \sum_{i=1}^{n} \frac{[(W_i \cos\theta_i)\tan\phi + (\Delta l_i)c]R + Ta}{(W_i \sin\theta_i)R}$$

gdzie (poza wcześniej zdefiniowanymi wyrazami) :

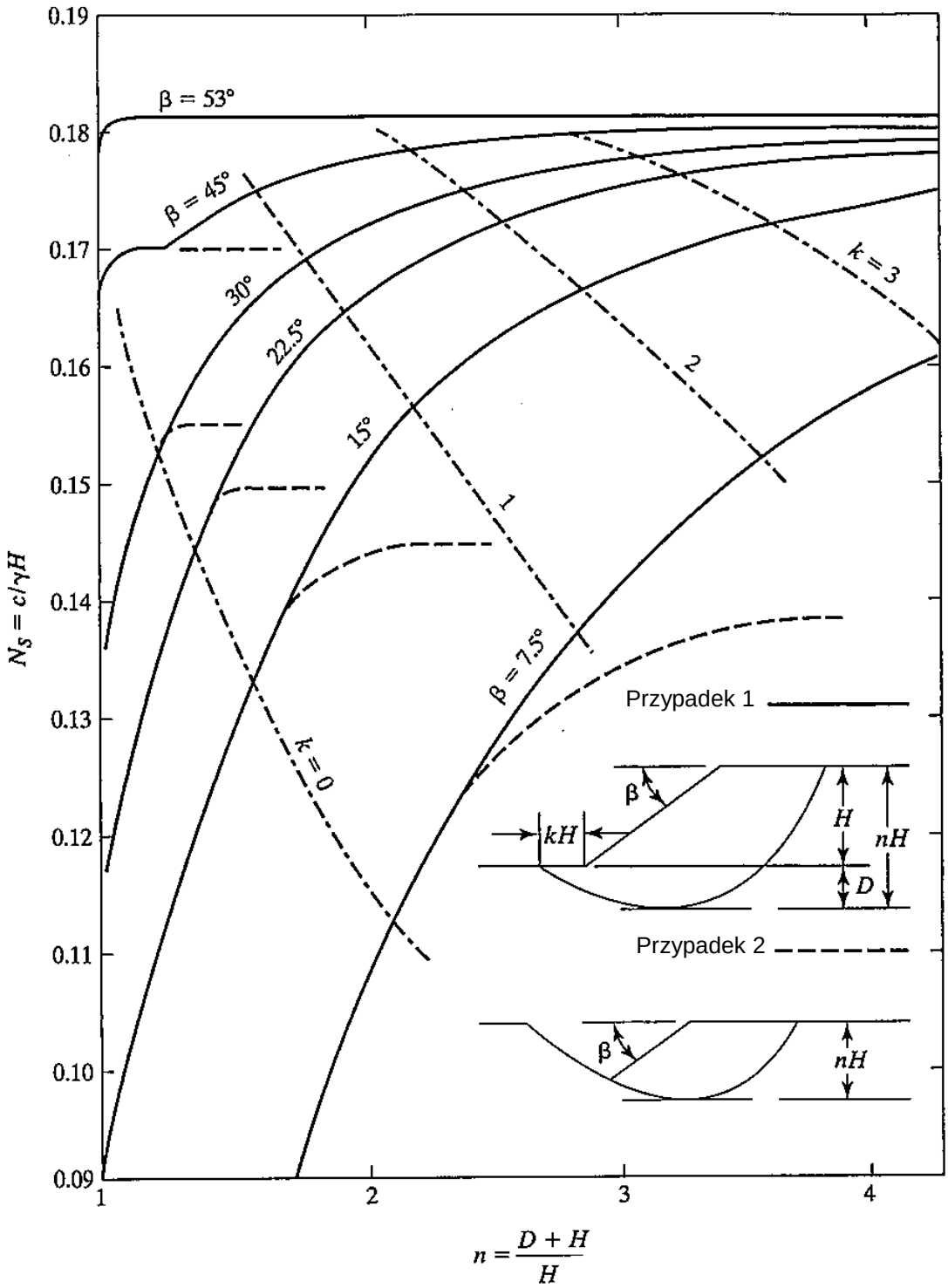
$T$ = $\sigma_{allow} t$, gdzie
$\sigma_{allow}$ = dopuszczalna wytrzymałość geomembrany
$t$ = grubość geomembrany
$a$ = ramię momentu równe $R$ .

W podobny sposób powinny być uwzględnione inne warstwy geosyntetyczne współpracujące z geomembraną, o ile zostaną zaprojektowane. Pominięcie tych warstw w obliczeniach spowoduje, że wynik będzie miał charakter zachowawczy.
Do sprawdzania tego typu schematów służą liczne programy inżynierskie oparte na metodzie Bishopa .
Na przestrzeni ostatnich lat bazując na licznych doświadczeniach wykonawczych opracowano wiele wykresów projektowych, z których można uzyskać przybliżone rozwiązania. Z wykożystaniem tych wykresów wiąże się następujące równanie :

$$FS = \frac{c}{N_S \gamma H}$$

gdzie:

FS = współczynnik bezpieczeństwa
$c$ = wytrzymałość nieodwodnionego gruntu (kN/m$^2$)
$\gamma$ = łączny ciężar właściwy (kN/m$^3$)
$H$ = wysokość skarpy w pionie (m)
$N_S$ = wskaźnik stateczności odczytany z rys. 9




Rys. 9. Wykresy stateczności ( wg. Taylora )

## 5.4.Stateczność obsypki skarpy.

Niezbędnym elementem obliczeń jest sprawdzenie stateczności obsypki na geomembranie przykrywającej skarpę.
Zaprojektowanie obsypki na skarpie jest podyktowane wieloma względami :

- ochrona przed utlenianiem,
- ochrona przed degradacją promieniami UV,
- ochrona przed przebiciem lub rozdarciem,
- zabezpieczenie przed podnoszeniem geomembrany przez wiatr (strona nawietrzna i zawietrzna ),
- ochrona przed wandalizmem.

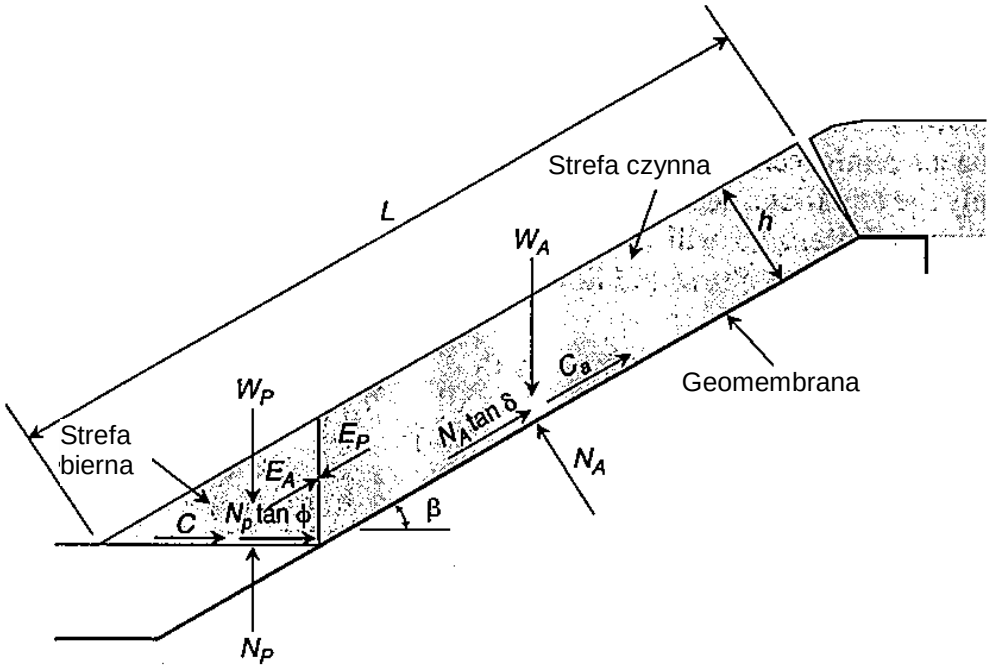
Obsypkę stanowi zazwyczaj cienka warstwa gruntu 0,3 ÷ 0,5 m, która ma tendencję do grawitacyjnego obsuwania się w dół po geomembranie.
Metoda projektowania w tym zakresie jest prosta i opiera się na warunkach równowagi granicznej.

$$FS = \frac{\text{sily utrzymujace}}{\text{sily powodujace osuniecie}}$$

$$FS = \frac{\tan\delta}{\tan\beta}$$

gdzie :

β = kąt nachylenia skarpy
δ = kąt tarcia pomiędzy geomembraną a obsypką




Rys. 10. Schemat sił działających na obsypkę na skarpie uszczelnionej geomembraną. [10

Skarpy obiektów inżynierskich wyłożonych geomembraną projektuje się na długości do 30 m. Przy dłuższych skarpach powinny być przewidziane ławy poziome.
Zgodnie z powyższym rysunkiem możemy obliczyć poszczególne jego elementy :

$$W_A = \gamma h^2 \left( \frac{L}{h} - \frac{1}{\sin\beta} - \frac{\tan\beta}{2} \right)$$

$$N_A = W_A \cos\beta$$

$$W_P = \frac{\gamma h^2}{\sin 2\beta}$$

Następnie obliczamy wartość FS z następującego wzoru

$$FS = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

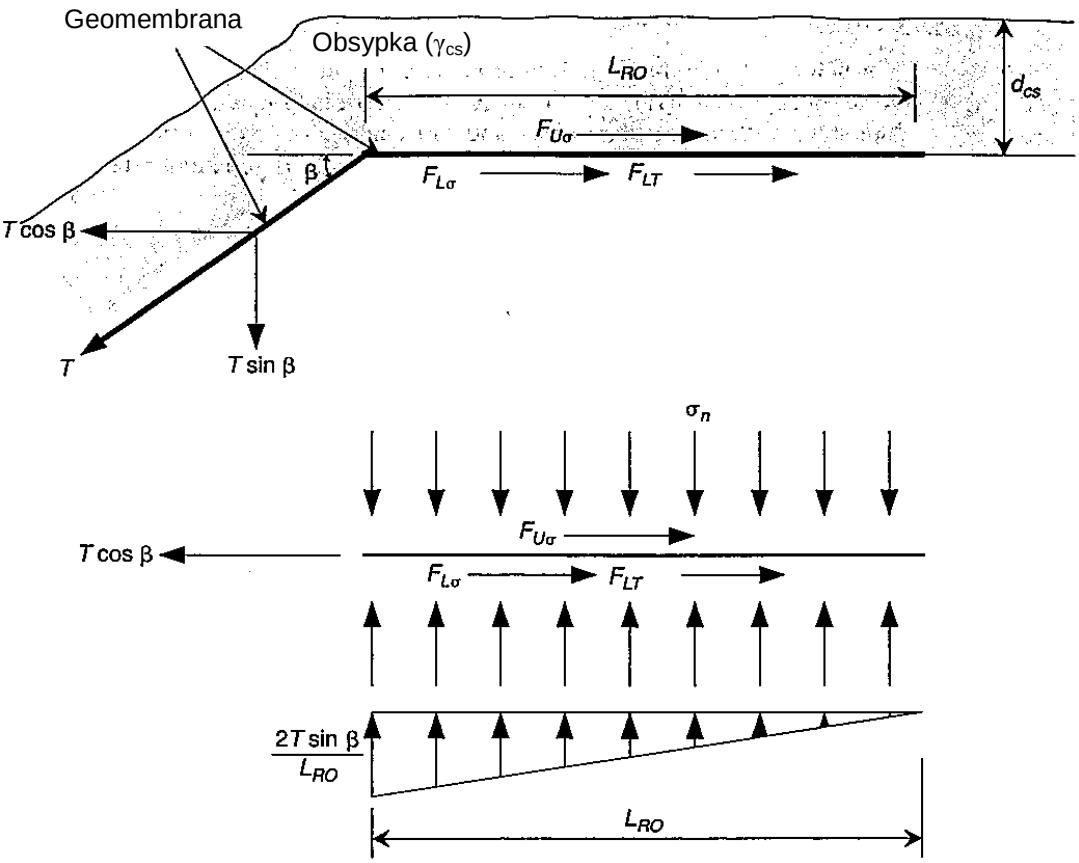
gdzie :
$W_A$ = masa całkowita strefy czynnej
$W_p$ = masa całkowita strefy biernej
$N_A$ = siła czynna prostopadła do płaszczyzny zniszczenia strefy czynnej
$N_P$ = siła czynna prostopadła do płaszczyzny zniszczenia strefy biernej
$\gamma$ = ciężar właściwy obsypki
$h$ = grubość obsypki
$L$ = długość skarpy mierzona wzdłuż geomembrany
$\beta$ = kąt nachylenia skarpy pod geomembraną
$\varphi$ = kąt tarcia obsypki
$\delta$ = kąt tarcia międzyfazowego pomiędzy gruntem a geomembraną
$C_a$ = siła adhezji pomiędzy obsypką strefy czynnej a geomembraną
$c_a$ = adhezja pomiędzy obsypką strefy czynnej a geomembraną
$a$ = $(W_A - N_A \cos\beta) \cos\beta$

$$b = -[(W_A - N_A \cos\beta)\sin\beta \tan\phi + (N_A \tan\delta + C_a)\sin\beta\cos\beta + \sin(C + W_p \tan\phi)]$$

$$c = (N_A \tan\delta + C_a)\sin^2\beta \tan\phi$$

W przypadku otrzymania zbyt niskiego współczynnika stateczności obsypki możemy zastosować geomembrany o uszorstnionych powierzchniach lub zastosować rozwiązania hybrydowe, np. pokrywając skarpę georusztami, geokomórkami lub oponami wzajemnie powiązanymi.

## 5.5.Projektowanie odcinka naziomu i rowu kotwiącego.




Rys.11. Schemat obliczeniowy do wyznaczenia odcinka naziomu. [13]

$$\sum F_x = 0$$

$$T_{allow} \cos\beta = F_{U\sigma} + F_{L\sigma} + F_{LT}$$

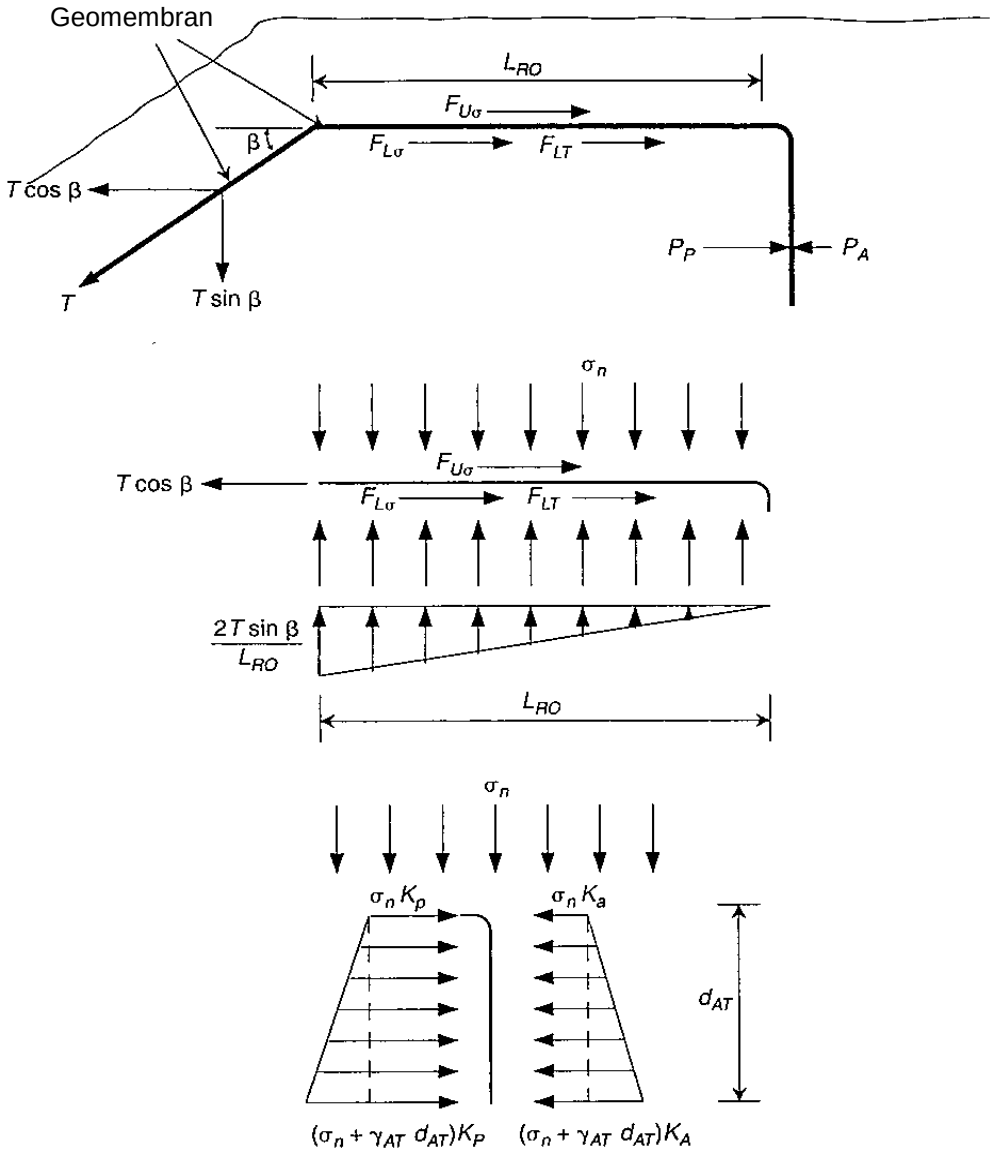
$$= \sigma_n \tan\delta_U (L_{RO}) + \sigma_n \tan\delta_L (L_{RO}) + 0{,}5\left(\frac{2T_{allow}\sin\beta}{L_{RO}}\right)(L_{RO})\tan\delta_L$$

$$L_{RO} = \frac{T_{allow}(\cos\beta - \sin\beta\tan\delta_L)}{\sigma_n(\tan\delta_U + \tan\delta_L)}$$

gdzie :

$T_{allow}$ = dopuszczalna siła dla geomembrany = $\sigma_{allow}t$, gdzie
$\sigma_{allow}$ = dopuszczalne naprężenie geomembrany
$t$ = grubość geomembrany
β = kąt nachylenia skarpy
$F_{U\sigma}$ = siła ścinająca nad geomembraną spowodowana przez obsypkę (należy zauważyć, że jeżeli nad geomembraną znajduje się cienka warstwa obsypki, prawdopodobne jest wystąpienie pęknięć naprężeniowych, a tę wartość będzie można pominąć)

$F_{L\sigma}$ = siła ścinająca pod geomembraną spowodowana przez obsypkę
$F_{LT}$ = siła ścinająca pod geomembraną związana z pionową składową siły $T_{allow}$
$\sigma_n$ = działające naprężenie normalne związane z obsypką
$\delta$ = kąt oporu tarcia pomiędzy geomembraną a przyległym materiałem (np. gruntem lub warstwą geotekstyliów)
$L_{RO}$ = długość odcinka naziomu geomembrany.




Rys.12. Schemat obliczeniowy do wyznaczania długości zakotwienia geomembrany. [13]

$$\sum F_x = 0$$
$$T_{allow} \cos\beta = F_{U\sigma} + F_{L\sigma} + F_{LT} - P_A + P_P$$

gdzie

$T_{allow}$ = dopuszczalna wytrzymałość geomembrany = $\sigma_{allow}t$, gdzie
$\sigma_{allow}$ = dopuszczalne naprężenie geomembrany
$t$ = grubość geomembrany
$\beta$ = kąt nachylenia skarpy
$F_{U\sigma}$ = siła ścinająca nad geomembraną spowodowana przez obsypkę (należy zauważyć, że jeżeli nad geomembraną znajduje się cienka warstwa obsypki, prawdopodobne jest wystąpienie pęknięć naprężeniowych, a tę wartość będzie można pominąć)
$F_{L\sigma}$ = siła ścinająca pod geomembraną spowodowana przez obsypkę
$F_{LT}$ = siła ścinająca pod geomembraną związana z pionową składową siły $T_{allow}$
$P_A$ = parcie czynne gruntu na ścianę rowu kotwiącego od strony zasypki
$P_P$ = odpór gruntu działający na ścianę rowu kotwiącego od strony skarpy.

Wartości $P_A$ i $P_P$ wymagają zastosowania teorii parcia bocznego gruntu.

Wielu producentów geomembran opracowuje własne wytyczne dotyczące długości odcinków naziomu i głębokości rowów kotwiących. Tego typu rozwiązania są dużym uproszczeniem, ponieważ każdy rodzaj geomembrany i jej grubość wymagają indywidualnych obliczeń.
W podobny sposób, projektant może analizować złożone rozwiązania, np., geomembranę obustronnie pokrytą geowłókniną lub geokratą wprowadzając te warstwy do rowu kotwiącego.

## 5.6.Podnoszenie geomembrany przez wiatr.

W trakcie instalacji płaszczyzny geomembrany pozostając nieosłonięte są szczególnie narażone na wpływ wiatru. Na wiatr poruszający się po geomembranie działają siły tarcia oraz występują turbulencje przesuwających się mas powietrza. W przypadku krawędzi o nierównych kształtach następuje rozdzielenie strumienia wiatru – powstaje siła ssąca będąca przyczyną niejednokrotnie poważnych problemów. Jeżeli siły ssące są większe od ciężaru geomembrany to geomembrana zostanie uniesiona i wyrwana z miejsca instalacji z przemieszczeniem w inne miejsce w sposób absolutnie przypadkowy. W takich sytuacjach geomembrana może z łatwością ulec rozdarciu i zostać poważnie uszkodzona. Stanowi jednocześnie poważne zagrożenie dla życia osób będących w pobliżu zdarzenia.
Wiatr o prędkości v ( m/s ) wywołuje ciśnienie dynamiczne ( $kN/m^2$ ) na konstrukcję gdzie jego prędkość zeruje się, o wartości :

$$w = v^2/16 \ \ [\ kN/m^2\ ]$$

W sytuacji dotyczącej poziomo ułożonej warstwy geomembrany na powierzchni terenu i przy prędkości wiatru 40 m/s okazuje się, że ciśnienie dynamiczne wynosi 1,0 $kN/m^2$.

Należy pamiętać, że wiatr powoduje na każdym elemencie powierzchniowym zorientowanym zarówno na stronę nawietrzną jak i zawietrzną parcie aktywne ( ciśnienie ) lub negatywne ( ssanie ) o wartości

$$p = c \cdot w \quad [\ kN/m^2\ ]$$

w – ciśnienie dynamiczne
c – współczynnik wiatrowy: - dodatni dla parcia aktywnego,
- ujemny dla ssania,
zależny od pozycji elementu i kąta natarcia wiatru na powierzchnię.

Posługiwanie się zestawieniami tabelarycznymi współczynników wiatrowych (c) wymagają od projektanta dokładnego rozpoznania topograficznego terenu inwestycji, wyznaczenia róży wiatru i zdefiniowania najbardziej niekorzystnych zdarzeń na powierzchni projektowanego uszczelnienia.
Dla przykładu, przy kącie natarcia wiatru ok. $30^0$ na powierzchnię otrzymujemy na krawędzi nawietrznej c = 1,6 ( dla parcia aktywnego ), a na krawędzi zawietrznej ( dla ssania ) c = 0,8.
Czynnik wiatru z niezrozumianych przyczyn jest, w większości przypadków opracowań projektowych, pomijany w obliczeniach. Oczywistym jest, że to projektant jest zobowiązany do zaproponowania rozwiązań zapewniających bezpieczeństwo konstrukcji jak i osób zaangażowanych w realizację zadania. Niejednokrotnie to wykonawca robót organizuje dociążenie płaszczyzn geomembrany we własnym zakresie przyjmując intuicyjnie wielkość obciążenia, a także przejmując na siebie wszelkie koszty zniszczonych powierzchni wyłożonej wcześniej geomembrany.

## 6.Zakończenie.

Od pierwszego zastosowania geomembrany HDPE w Polsce minęło już 23 lata. Projekt, a później wykonawstwo dotyczyło budowy składowiska odpadów pogalwanicznych dla ówczesnego ZSI Polam w Szczecinku.
Na przestrzeni tych lat zmieniło się wiele. Od ustawodawstwa i norm po powszechność rozwiązań z geomembranami i zmianę mentalności osób przygotowujących inwestycje. Zastosowanie geomembran do wszelkiego typu uszczelnień w konstrukcjach ziemnych oraz inżynierskich stało się powszechne wręcz nakazane przepisami. Wysoka odporność na różnego typu czynniki degradujące, opracowane w szczegółach systemy wbudowania i montażu stanowią dla tego materiału warunki do stosowania w skali i zakresie nieograniczonym.
Mając na uwadze bardzo dynamicznie rozwijającą się dziedzinę uszczelnień oraz konieczność zapewnienia wysokich standardów projektów i wykonawstwa należy dążyć do opracowania bardzo szczegółowych procedur obowiązujących wszystkie strony procesu inwestycyjnego ze specyfikacjami i przetargami na czele.

Literatura :


1. Adams M.W., Wagner N.: Forensic study of an HDPE liner. GFR 2000
2. Allan S. : Index puncture testing of geomembranes. GFR 2000
3. BS 8006:1995. Code of practise for strengthned/reinforced soil and other fills
4. Cadwallader M.: Enhancing geomembrane containment performance. GFR 2002
5. Fanti K.: Stawy osadowe i składowiska. Wyd.PW, W-wa 1980
6. Geotechnika składowisk odpadów. Tłum. Z  jęz. Ang. W-wa 1994 r.
7. Ivy N.: HDPE geomembrane after 20 years of service. GFR 2002
8. Jermołowicz P.: Budowa bezpiecznych wysypisk śmieci i składowisk odpadów przemysłowych. Mat. Z konf. „Wysypiska i składowiska „ – Kołobrzeg 1992 r.
9. Jurasz F. : Kompleksowa gospodarka odpadami w gminie. ARP-Poligrafia, W-wa 1998 r.
10. Koerner R.M.: Designing with geosynthetics. (Fifth edition) Prentice Hall 2005
11. Leshchinsky D.: Design software for geosynthetic-reinforced soil structures. GFR 2002
12. Mackey R.: Geosynthetics terminology. GFR 2002
13. Martin J.P., Koerner R.M.: Geotechnical design considerations for geomembrane lined slopes : slope stability. Geotextiles and geomembranes vol. 2, 1985
14. Materiały informacyjne firm: SLT, Gundle, Naue-Fasertechnik, GSE  i  Atarfil
15. Młynarek J. [ i in.] : Wyznaczanie kąta tarcia i dhezji w kontakcie geomembran HDPE i gruntów. Mat. Z konferencji – Geotechniczne aspekty składowania odpadów, Gdańsk 1994
16. Naue-Fasertechnik : Moderne deponieabdeckungen. 1992
17. Phaneuf R., Peggs I.: Landfill construction quality. GFR 2001
18. PN-EN 13257:2002  Geotekstylia i wyroby pokrewne. Właściwości wymagane przy stosowaniu w budowie składowisk odpadów stałych.
19. Richardson G.N.: Exposed geomembrane covers: designer’s forum. Part 1-2. GFR 2000
20. Richardson G.N.: Slope stability considerations forlined landfills: designer’s forum. GFR 2002
21. Richardson G.N., Pavlik K.L.: Lessons learned from failure: landfill covers. GFR 2004
22. Rollin A.L. [i in.] :Leak location in exposed geomembrane liners using an electrical leak detection technique. Proc of Geosynthetics Conf.MN 1993 (USA)
23. Rowe R.K.,Soderman K.L.: Geotextile reinforcement of embankments on peat. Geotextiles and geomembranes vol. 2, 1985
24. Rozporządzenie Min. Środowiska w sprawie szczegółwych wymagań dot. lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów. Dz.U. 61, poz.549 z 24.032003 r. (z późniejszymi zmianami)
25. Spink T.: Software for geosynthetic engineering. GFR 2001
26. Thiel R. [ i in.] : Geocomposite drainage layers in landfills. Designer’s forum. Part 1-4. GFR 2005
27. Zitcher F.F.: Resistance to microorganisms and rodents. Plastics in water engineering.

# CZĘŚĆ II

## Warunki techniczne wykonania i odbioru warstw uszczelnień z zastosowaniem geomembran w obiektach typu składowiska, wylewiska i zbiorniki.

# 1.Warunki techniczne wykonywania i odbioru warstw uszczelnień z zastosowaniem geomembran.

Składowiska odpadów komunalnych i przemysłowych, wylewiska nieczystości i substancji toksycznych jak również wszelkiego rodzaju zbiorniki ziemne, żelbetowe i stalowe są szczególną grupą obiektów w których zastosowane geosyntetyki powinny podlegać surowym reżimom technologicznym i zrozumieniem celu przedsięwzięcia przez wszystkie strony biorące udział w realizacji inwestycji.
Poszczególne etapy planowanej inwestycji przeważnie realizowane są w następującej kolejności :

- Lokalizacja inwestycji,
- Warunki hydrogeologiczne,
- Określenie przekroju,
- Wybór materiału geomembranowego,
- Określenie grubości,
- Detale związane ze skarpami i obsypką,
- Detale związane z rowem kotwiącym,
- Stabilność odpadów stałych,
- Projekt i szczegóły rekultywacji,
- Strategia badań spoin (niszczących i nieniszczących),
- Projektowanie połączeń i wyposażenia,
- Powstawanie nieszczelności warstwy i sposoby naprawy,
- Kontrola jakości,
- Odbiór końcowy budowy.

## 1.1.Przygotowanie podłoża

Podłoże gruntowe pod uszczelnienie z geomembrany do głębokości 15 cm powinno być utworzone z gruntów o średnicy ziaren nie przekraczających 2,0 mm i w zależności od rodzaju obiektu odpowiadać zapisom Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji budowy, eksploatacji i zamknięcia jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk.
Układanie geomembran na podłożu naturalnym wymaga szczególnie dokładnego jego przygotowania, poprzez usunięcie korzeni, kamieni i innych ostrokrawędzistych przedmiotów oraz gruntów słabych ( torfów i namułów ).
Nie dopuszcza się układania geomembran na podłożu nawodnionym i przy lokalnych wysiąkach wody. Tego typu powierzchnie powinny być zdrenowane. Ze względu na to, że geomembrany silnie podlegają procesom reologicznym niedopuszczalne jest pozostawienie w podłożu kamieni.
Podłoże powinno spełniać warunki I i II stanu granicznego nośności i użytkowania.

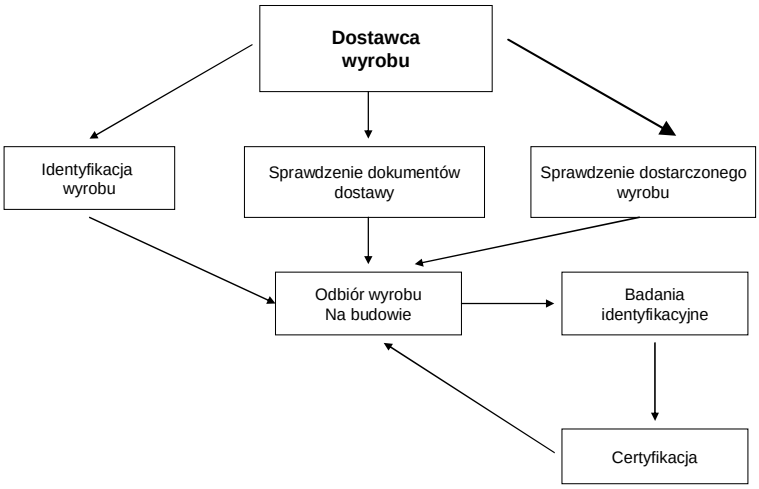
Maksymalna dopuszczalna głębokość kolein w trakcie układania geomembrany nie może przekraczać 10 mm. Podłoża betonowe i skalne powinny być starannie wygładzone bez wyraźnych spękań i ostrych krawędzi.
Wszelkie załamania powierzchni i naroża powinny być zaokrąglone krzywizną o promieniu około 50 mm.
Często w takich przypadkach projektuje się zastosowanie geowłóknin ochronnych jedno lub dwustronnych minimalizując w ten sposób możliwość przebicia od strony podłoża. Przygotowanie podłoża pod geomembrany powinno być nadzorowane przez geotechnika. W trakcie wykładania geomembran w zbiornikach z płaszczem stalowym należy zwrócić uwagę na dokładność zeszlifowania spoin oraz dokładność usunięcia wszelkich elementów montażowych.
Przygotowanie podłoża powinno być poddane wizji lokalnej z udziałem przedstawicieli inwestora, wykonawcy robót ziemnych, firmy instalującej geomembranę i nadzoru inwestorskiego.
Z wizji lokalnej powinien być sporządzony protokół w, którym powinny być wymienione ewentualne zastrzeżenia co do jakości oraz wszelkie uwagi dotyczące koordynacji prac.

## 1.2.Materiały.

Do wykonywania uszczelnień z tworzyw sztucznych na różnego rodzaju obiektach dopuszcza się jedynie geomembrany mające deklarację zgodności lub certyfikat zgodności z normą materiałową lub z aprobatą techniczną. Właściwa identyfikacja wyrobu na budowie jest podstawą kontroli jakości wyrobu i decyduje o jakości wykonanego obiektu. Sam wygląd zewnętrzny geomembrany nie może być podstawą oceny, chyba że wyrób i jego opakowanie są wyposażone w nie budzące wątpliwości znaki identyfikacyjne producenta i zawierają odpowiednie oznakowania z numeracją partii produkcyjnej i poszczególnych bel wraz z podaniem systemu kontroli jakości producenta.

Fot.1. Przykłady znaków identyfikacyjnych na geomembranach.

W przypadku dostarczenia na budowę wyrobu nie zawierającego znaków identyfikacyjnych, należy przeprowadzić badania polegające głównie na stwierdzeniu, że wyrób posiada parametry zgodne z deklarowanymi w danych producenta i został wyprodukowany z odpowiedniego granulatu.




Rys. 1. Schemat systemu odbioru materiału na budowie.

W przypadku wystąpienia sporu pomiędzy dostawcą, a odbiorcą geomembrany przeprowadza się certyfikację wyrobu. Certyfikat zgodności jest dokumentem wystawionym przez upoważnioną do tego celu trzecią stronę, najczęściej akredytowane laboratorium z potwierdzeniem, że dostarczony wyrób na konkretne zadanie jest zgodny z aprobatą techniczną, znakiem CE lub danymi technicznymi wykazanymi w karcie wyrobu. Akredytacja laboratoriów, rodem z USA, ma na celu przede wszystkim ujednolicenie wysokiego poziomu prowadzenia badań certyfikacyjnych przez wszystkich.

| Parametr | Jednostka miary | Metoda badania według | Geomembrana z PE-HD o grubości | | | Geomembrana z PVC o grubości | | Geomembrana z PP o grubości | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1,5 mm | 2,0 mm | 2,5 mm | 1,5 mm | 2,0 mm | 1,5 mm | 2,0 mm |
| a) gęstość | g/cm³ | PN-C-89035:1992 | > 0,94 | > 0,94 | > 0,94 | > 1,2 | > 1,2 | > 0,9 | > 0,9 |
| b) wytrzymałość na rozciąganie | | PN-C-89034:1981 | | | | | | | |
| – przy płynięciu | MPa | próbka wiosełkowa | > 15 | > 15 | > 15 | – | – | – | – |
| – przy zerwaniu | MPa | próbka 200 mm | – | – | – | > 15 | > 15 | > 15 | > 15 |
| c) wydłużenie | | PN-C-89034:1981 | | | | | | | |
| – przy płynięciu | % | próbka wiosełkowa | > 12 | > 12 | > 12 | – | – | – | – |
| – przy zerwaniu | % | próbka 200 mm | > 560 | > 560 | > 560 | > 400 | > 400 | > 600 | > 600 |
| d) wytrzymałość na rozdzieranie | N | PN-C-89091:1983 próbka Gravesa | > 175 | > 230 | > 285 | > 65 | > 80 | > 150 | > 200 |
| e) odporność na przebicie (CBR) | N | ISO 12236:1994 | >2 500 | >3 000 | >3 500 | >2 000 | >2 500 | >2 000 | >2 500 |
| f) zmiany wymiarów liniowych w wysokiej temperaturze | % | PN-C-89093:1983 100 °C, 1 godzina | < 2,0 | < 2,0 | < 2,0 | < 5,0 | < 5,0 | < 2,0 | < 2,0 |
| g) współczynnik rozszerzalności cieplnej | $°C^{-1}$ | PN-C-89021:1982 | $< 2x10^{-4}$ | $< 2x10^{-4}$ | $< 2x10^{-4}$ | – | – | – | – |
| h) utrata substancji lotnych | % | PN-C-89087:1986 | – | – | – | < 0,5 | < 0,5 | – | – |

Tab.1. Parametry geomembran stosowanych na składowiskach odpadów. [17]

Podstawowymi tworzywami do produkcji geomembran są :

- PEHD ( polietylen o wysokiej gęstości )
- PCV ( polichlorek winylu )
- PP ( polipropylen )

Dopuszcza się również geomembrany produkowane z innych tworzyw pod warunkiem, że będą miały określone zastosowania.

## 1.3.Dostawa geomembrany na plac budowy.

Każda dostawa na plac budowy powinna posiadać ważne świadectwo systemu kontroli jakości producenta, kartę gwarancyjną producenta materiału oraz charakterystyczną i widoczną metkę na każdej beli.

Sprawdzeniu podlega :

- nazwa producenta geomembrany,
- nazwa handlowa geomembrany,
- rodzaj tworzywa sztucznego,
- nazwa i producent granulatu, z którego wytworzono geomembranę,
- numery rolek z danej partii,
- data produkcji,
- okres gwarancji na dostarczona partię materiału,
- grubość geomembrany,
- wymiary i masa rolki.

W momencie dostawy należy zdjąć lub spisać informacje zawarte na belach i zatrzymać do momentu odbioru całości obiektu. Rozwijanie losowo wybranych bel dla oceny ich jakości w warunkach budowy jest bardzo trudne i rzadko tę czynność przeprowadza się. Stąd najlepiej dokonać tego w trakcie układania pierwszej partii geomembrany. Należy przy

tym zwrócić uwagę na ewentualne uszkodzenia powierzchni, zabrudzenia i istnienie obcych ciał po wewnętrznych stronach rozwijanych bel.

### 1.4.Transport i składowanie geomembrany na budowie.

Czynności związane z transportem, przemieszczaniem wewnątrz budowy oraz składowanie powinny odpowiadać instrukcji producenta, gdyż od tego również zależy spełnienie warunków gwarancji udzielonej przez producenta. Do operacji tych należy używać sprzętu budowlanego, który nie powoduje uszkodzeń mechanicznych materiału. Do podnoszenia i przemieszczania należy stosować zawiesia z pasm tkaninowych o gwarantowanych wytrzymałościach na zerwanie ( z reguły producenci zaopatrują każdą rolkę materiału w dwa zawiesia z taśm PES ) . Można stosować belki trawersowe. Nie dopuszcza się stosowania zawiesi z lin stalowych.

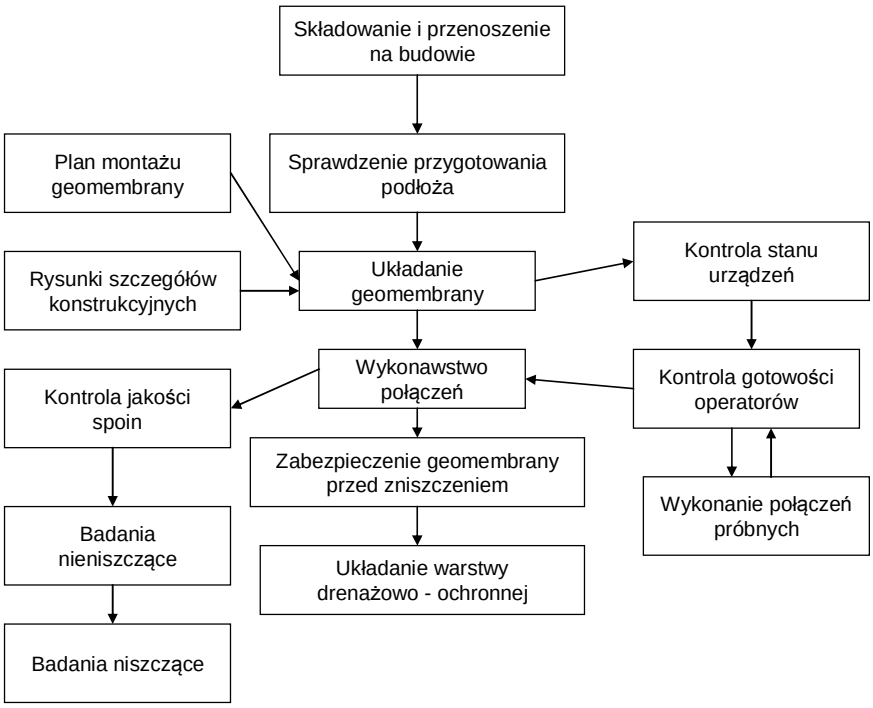
Fot.2. Różne sposoby podnoszenia bel.

Materiał powinien być składowany na obszarze chronionym, na suchym i płaskim podłożu, oczyszczonym z ostrokrawędzistych ziaren i przedmiotów, a także zabezpieczony przez wpływami atmosferycznymi. Jeżeli instrukcja producenta nie przewiduje inaczej, belki geomembrany należy składować w 3 - 4 warstwach w formie pryzmy lub z przekładkami międzywarstwowymi w postaci belek drewnianych. Dolna warstwa powinna być zabezpieczona przed stoczeniem się drewnianymi klinami.

Fot.3. Miejsce składowania geomembran.

## 2.Kontrola i zapewnienie jakości na budowie.

Ze wszystkich do tej pory omówionych geosyntetyków żaden nie jest tak „wymagający” jak geomembrany. Najmniejsza nieszczelność materiału lub połączenia może spowodować wyciek izolowanej cieczy pod ciśnieniem hydrostatycznym. Dlatego tak ważnym staje się opracowanie i wdrożenie kontroli jakości ( KJ ) i procedur zapewnienia jakości ( ZJ ) .




Rys.2. Schemat kontroli jakości wykonawstwa na budowie.

### 2.1. Plan kontroli jakości .

Plan kontroli jakości powinien być uzgodniony między projektantem, inspektorem nadzoru i wykonawcą.

Poniżej przedstawiono prawidłowy tok postępowania prowadzący do zapewnienia jakości uszczelnienia :

- udokumentowanie rozładunku przywiezionych rolek geomembrany (sprawdzenie i opisanie poszczególnych rolek, sprawdzenie atestów producenta, numeracji rolek itp.),
- kontrolowanie składowania i przenoszenia rolek na budowie,
- wyselekcjonowanie próbek w celu przeprowadzenia badań (w przypadku wątpliwości co do jakości dostarczonego materiału),

- sprawdzenie oznaczeń pobranych próbek w powiązaniu z numeracją fabryczną rolek i przy zaznaczeniu kierunków wzdłuż i w poprzek beli,
- przeprowadzenie wspólnego przeglądu wykonanego podłoża pod geomembranę przez inspektora nadzoru, wykonawcę robót ziemnych i instalatora geomembrany,
- w trakcie układania geomembrany należy codziennie notować w dzienniku budowy warunki pogodowe (temperatura, wilgotność powietrza, opady deszczu i wiatr).Jeżeli warunki pogodowe są niezgodne z warunkami określonymi w planie kontroli jakości, inspektor nadzoru zobowiązany jest przerwać układanie geomembrany,
- sprawdzenie poprawności rozmieszczania poszczególnych rolek w powiązaniu z projektem,
- przed rozpoczęciem i zakończeniem wykonywania spoin należy wykonać próbne zgrzewanie. Pobrane próbki ze spoin należy zerwać na zrywarce polowej na budowie. Operacja ta ma na celu ścisłą kontrolę operatorów i sprzętu. Jeżeli próbnie wykonane spoiny nie odpowiadają jakościowo wymaganiom producenta, to należy odrzucić brygadę wykonującą roboty lub sprzęt stosowany na budowie,
- dla kolejno wykonywanych spoin należy przyjąć sposób oznaczania i udokumentować to na planie montażu , w którym należy również wpisać nazwisko operatora sprzętu, rodzaj stosowanego sprzętu, datę i godzinę wykonania konkretnej spoiny oraz warunki pogodowe,
- każda spoina powinna być kontrolowana na bieżąco jedną z metod nieniszczących (omówione będą w dalszej części niniejszego opracowania),
- należy wybrać miejsca pobrania próbek do badań niszczących ( omówione w dalszej części opracowania). Inspektor nadzoru powinien nadzorować wycinanie próbek przez ekipę instalatora geomembrany. Pobieranie próbek powinno być również udokumentowane z określeniem miejsca pobrania, daty, warunków otoczenia, wraz z numeracją ,
- wyniki badań polowych i laboratoryjnych powinny być na bieżąco interpretowane przez inspektora nadzoru i przez instalatora w celu przyjęcia lub odrzucenia wykonanej partii robót,
- należy ściśle nadzorować załatanie miejsc pobrania próbek do badań niszczących oraz przeprowadzić badanie nieniszczące nowo wykonanych spoin,
- w czasie wykonywania robót należy wykonać systematyczny przegląd całej powierzchni geomembrany w celu zlokalizowania i udokumentowania różnych defektów,
- przed układaniem warstwy ochronnej należy dokonać odbioru zakrywanej części geomembrany. Układanie obsypki na powierzchni geomembrany powinno być ściśle nadzorowane, gdyż może spowodować uszkodzenie geomembrany.

## 3. Metody łączenia geomembran.

Najważniejszym aspektem instalacji geomembran są spoiny – połączenia poszczególnych arkuszy geomembrany. Prawidłowe wykonawstwo spoin decyduje o szczelności całego układu. Dlatego też zagadnienie to powinno być przedmiotem szerszych opracowań praktycznych jak i teoretycznych skierowanych do wszystkich uczestników procesu inwestycyjnego. Osiągnięcie stosownego zasobu wiedzy na temat połączeń geomembran na budowie nie tylko przez operatora sprzętu zgrzewającego ale również przez projektanta i nadzór inwestorski powinno doprowadzić do eliminacji wielu błędów .

### 3.1.Układanie geomembrany.

Poszczególne bele geomembrany powinny być tak rozmieszczane na placu budowy, aby ograniczyć do niezbędnego minimum ich przemieszczanie. Rozwijanie poszczególnych bel powinno odbywać się za pośrednictwem specjalnych belek trawersowych, osi z kółkami ogumionymi lub stojaków łożyskowanych.

Fot. 4. Rozmieszczanie bel geomembran.

Należy przestrzegać pewnych generalnych zasad układania poszczególnych arkuszy geomembrany :

- najpierw należy instalować pasma na skarpach, rozwijając je od korony do podstawy skarpy unikając przy tym wszelkich zbędnych naprężeń w geomembranie,
- poszczególne pasma układa się prostopadle do skarpy, dzięki czemu spoiny nie stanowią przeszkody dla spływu wód opadowych,
- należy unikać układania geomembrany na zbyt stromych skarpach. Jest to często przyczyną awarii uszczelnienia ,
- w dnie składowiska należy rozwijać poszczególne pasma wzdłuż spadku dna, zaczynając od najniższego punktu,

- należy unikać schodzenia się wielu spoin w jednym punkcie, szczególnie w narożach niecki składowiska.

Zaleca się rozwijanie pasm przewidzianych do zgrzewania w danym dniu o jednakowej porze w celu wyeliminowania napięć wynikających z efektów temperaturowych. Wynikiem korozji naprężeniowej może być rozerwanie materiału w rejonie połączenia. Powierzchnie kontaktu czyli zakłady poszczególnych pasm powinny być wyrównane na całej długości i posiadać jednakową szerokość dla danej technologii łączenia. Powierzchnie kontaktowe łączonych pasm powinny być wolne od zanieczyszczeń, kurzu, wilgoci i innych substancji obcych. Optymalna temperatura otoczenia w trakcie wykonywania połączeń powinna wynosić od $+5^0$C do $+ 40^0$C. Nie należy dopuszczać do tego, aby roboty były wykonywane w temperaturze geomembrany niższych niż $+ 5^0$C. Łączenie geomembrany przy niższych temperaturach otoczenia dopuszcza się sporadycznie pod warunkiem stosowania na budowie specjalnych tuneli ocieplanych.

Wykonywanie robót w takich warunkach powinno być poprzedzone odpowiednim przygotowaniem łączonych powierzchni i prowadzone pod szczególnym nadzorem niezależnej jednostki badawczej. Nie należy również prowadzić tego rodzaju robót w trakcie silnego wiatru i deszczu. Wilgoć w istotny sposób wpływa na jakość spoin, dlatego każdorazowo przed rozpoczęciem robót należy sprawdzić tzw. „punkt rosy”.

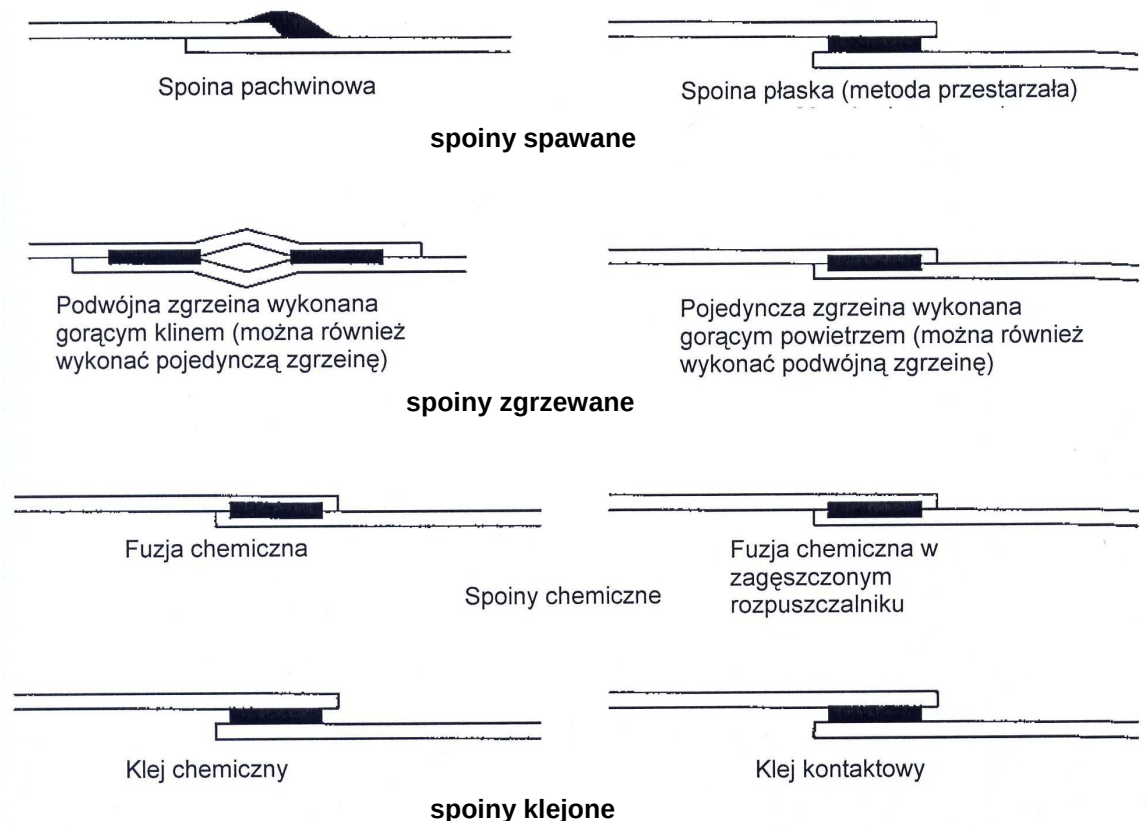
### 3.2.Metody wykonywania spoin.

Podstawowy mechanizm łączenia geomembran polimerowych polega na tymczasowej reorganizacji struktury polimeru poprzez stopienie lub zmiękczenie na dwóch przyległych powierzchniach, które są poddawane procesowi łączenia ze sobą w kontrolowany sposób, tak aby po przyłożeniu nacisku oba arkusze zostały ze sobą trwale połączone. Ta reorganizacja jest skutkiem dopływu energii wydzielającej się w wyniku zachodzących procesów cieplnych lub chemicznych. Niektóre procesy lub techniki zgrzewania wymagają wprowadzenia innego polimeru w obszar spoiny. Właściwości obszaru wykonanej spoiny są funkcją rodzaju geomembrany i zastosowanej techniki łączenia arkuszy.

| Procesy cieplne | Procesy chemiczne |
|---|---|
| Spawanie ekstruzyjne : | Chemiczne : |
| - spoina pachwinowa | - fuzja chemiczna |
| -spoina płaska (metoda nie jest już stosowana) | -fuzja chemiczna w zagęszczonym rozpuszczalniku |
| Zgrzewanie : | Klejenie : |
| -zgrzewanie gorącym klinem | - klej chemiczny |
| - zgrzewanie gorącym powietrzem | - klej kontaktowy |

Tab.2. Metody łączenia geomembran.

Poza tym stosuje się jeszcze metodę ultradźwiękowa i elektryczną.




Rys.3. Różne metody łączenia geomembran. [10]

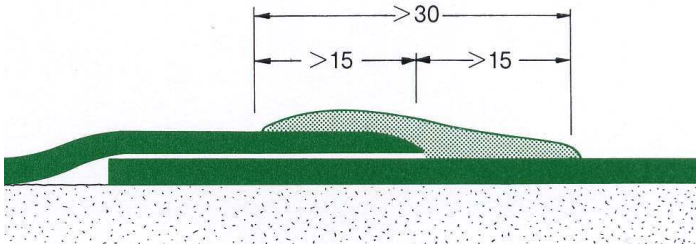
### 3.2.1.Spoiny spawane ekstruzyjnie.

Spoiny spawane zwane także spawaniem akstruzyjnym w formie spoiny powierzchniowej stosuje się rzadko, jedynie w miejscach trudno dostępnych, do łatania dziur, miejsc po pobranych próbkach do badań niszczących i do wykonywania spawów wokół elementów przenikających geomembranę, tj. wszelkiego rodzaju rurociągów odciekowych, zasilających, studni itp.

Technologia wykonania tego typu spoin polega na wykorzystaniu urządzenia zw. ekstruderem roztapiającego drut wykonany z tego samego materiału co geomembrana. Pasmo roztopionego polimeru nakłada się na krawędź górnego pasma geomembrany . Górna i dolna płyta są wcześniej podgrzewane miejscowo gorącym powietrzem, a dodatkowa energia cieplna od roztopionego drutu polietylenowego powoduje częściowe roztopienie obu łączonych powierzchni. W wyniku tych operacji roztopione masy wzajemnie przenikają się i tworzą jednolite połączenie. Proces wstępnego ogrzewania łączonych powierzchni musi być ściśle kontrolowany aby uniknąć przegrzania, osłabiającego strukturę geomembrany w rejonie spoiny. Aby uzyskać połączenie obu płyt, należy stosować docisk łączonych krawędzi.

Szybkość wykonywania spoiny mieści się w zakresie 30 ÷ 50 m/h, a stapianie i napawanie odbywa się e temperaturze 250 $^{0}$C. Prawidłowość połączenia obu pasm w tej technologii

wymaga wstępnego oczyszczenia obu płaszczyzn poprzez zeszlifowanie flexem na szerokości odpowiadającej szerokości wykonanej spoiny.




Rys.4. Spoina spawana.

Fot.5. Spawanie geomembran.

### 3.2.2.Zgrzewanie

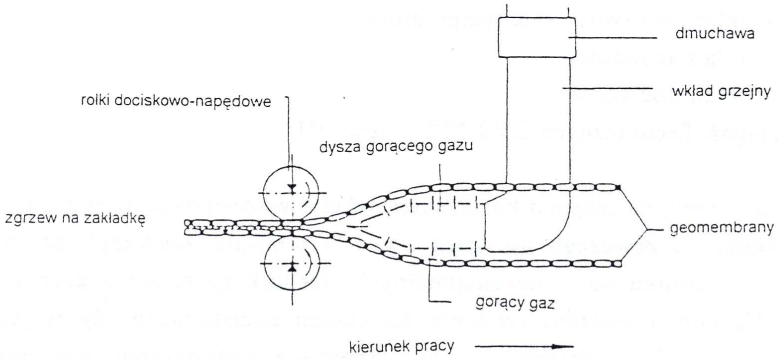
Istnieją dwie metody zgrzewania (stapiania) geomembran, które można stosować w przypadku wszystkich geomembran termoplastycznych omówionych w ramach poprzednich szkoleń.

Są to :

- metoda gorącego powietrza,
- metoda gorącego klina.

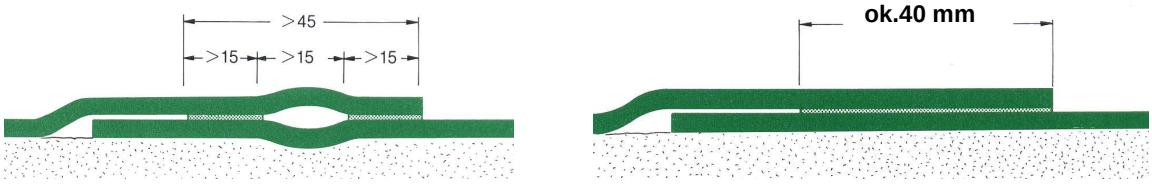
Obie te metody wymagają stopienia części przylegających do siebie powierzchni. Dlatego ważną rolę odgrywa tu temperatura, nacisk i prędkość zgrzewania. W metodzie zgrzewania gorącym powietrzem wykorzystuje się urządzenie składające się z nagrzewnicy oporowej w formie klina i wewnętrznej dmuchawy oraz regulatorów temperatury. Bezpośrednio po stopieniu powierzchni obszar ten jest dociskany w celu połączenia obu płaszczyzn. W zależności od kształtu dmuchawy jak również rolek dociskowych otrzymujemy zgrzew jedno – lub dwuśladowy.

Fot.6. Zgrzewarka gorącym powietrzem.

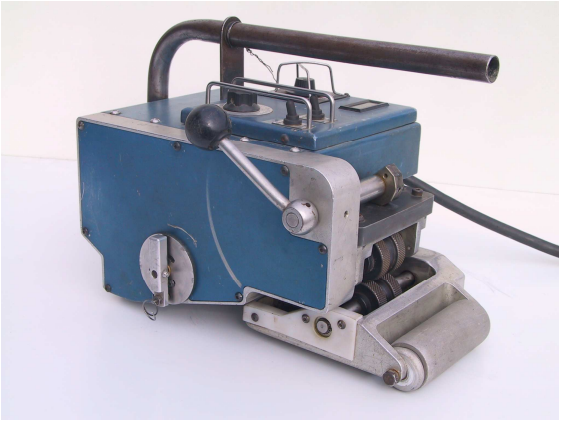



Rys.5. Schemat zgrzewania gorącym powietrzem. [13]

Metoda gorącego klina polega na zastosowaniu elementu oporowego w kształcie klina z wbudowanym systemem grzałek elektrycznych i termostatu przesuwającego się pomiędzy arkuszami geomembrany. Powierzchnie łączonych arkuszy topią się i poprzez płynny ruch ślizgowy przesuwają się do rolek dociskowych lub wałków dzięki czemu otrzymuje się gotowy zgrzew. Standardowa zgrzewarka wykonuje pojedynczy zgrzew o stałej szerokości, natomiast zgrzewarka z podwójnym klinem wykonuje dwa równoległe zgrzewy z pozostawieniem pośrodku kanału „powietrznego" o stałej szerokości, który wykorzystuje się do ciśnieniowych badań szczelności.




Rys.6. Schematy różnych połączeń za pomocą gorącego klina.



Fot. 7. Zgrzewarka dwuśladowa z gorącym klinem.

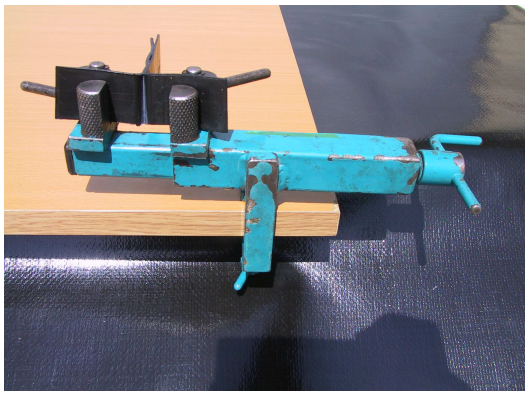
Sprzęt najnowszej generacji do zgrzewania dwuśladowego wyposażony jest już w elektroniczny system kontrolny, który umożliwia poprzez rejestrację parametrów łączonej spoiny wskazanie wadliwie wykonanych odcinków.
Średnia temperatura klina zależy od warunków otoczenia i grubości materiału i waha się w granicach 300 – 380$^0$C. Prędkość zgrzewania : 70 - 90 m/h.
Pozostałe metody łączenia geomembran są na tyle rzadko stosowane w warunkach polowych, że pominięto ich opis w niniejszym opracowaniu.

### 3.3.Plany i schematy montażu.

Bardzo istotną rolę w kontroli jakości robót uszczelnieniowych odgrywa bieżąca inwentaryzacja układu poszczególnych arkuszy geomembrany. Tego typu plany i schematy montażu powinny być integralną częścią projektu. Wykonawca przed przystąpieniem do robót powinien przedstawić nadzorowi do zatwierdzenia tego typu plan z ewentualnymi swoimi poprawkami. Szczegóły konstrukcyjne przejść rurowych, uszczelnień i połączeń z obiektami żelbetowymi lub stalowymi powinien bezwzględnie opracować i zamieścić w swoim opracowaniu projektant, a ich wykonanie na budowie powinno być prowadzone pod szczególnym nadzorem. Na planie montażu powinny być nanoszone na bieżąco postępy robót z nanoszeniem numerów bel i numeracją spoin. Wszystkie spoiny powinny być poddane badaniom nieniszczącym, a miejsca poboru próbek do badań niszczących nanosić z dodatkową numeracją.
Zgodnie z planem montażu powinny być dokonywane wszystkie wpisy do dziennika budowy i do protokołów kontroli jakości wymaganych normą.
Po zakończeniu montażu konstrukcji geomembrany plan montażu stanowi podstawę odbioru robót i jest archiwizowany u Inwestora.

### 3.4.Kontrola jakości wykonanych zgrzewów.

Przed przystąpieniem do robót w danym dniu w obecności przedstawiciela nadzoru należy przeprowadzić próbne zgrzewanie lub spawanie w celu sprawdzenia dyspozycji instalatora, sprawności sprzętu i doboru odpowiednich parametrów urządzeń do warunków atmosferycznych panujących na budowie.
Próbne zgrzewanie przeprowadza się na dwóch wąskich ścinkach geomembrany o długości 1 ÷ 3 m, najlepiej aby była na nich jedna ciągła spoina, co pozwoli spełnić wszystkie wymogi badania.
Badania wytrzymałościowe przeprowadza się na próbkach pasmowych o szerokości 25 mm wyciętych z odcinka poddanego próbnemu zgrzewaniu.
Wykonując tego typu badania wstępne można ograniczyć do minimum konieczność pobierania próbek do badań niszczących na budowie. Do tego celu można wykorzystać zrywarki ręczne jak i mechaniczne z rejestracją parametrów.



Fot.8. Zrywarki – ręczna i mechaniczna.

Dopiero po wykonaniu badań wstępnych można przystąpić do właściwego wykonawstwa zgrzewania geomembrany.
Każda spoina powinna zostać skontrolowana na bieżąco za pomocą jednej z metod nieniszczących, na całej swojej długości i w obecności nadzoru inwestorskiego. Wyniki badania należy wpisać do protokołów ( w przypadku metody ultradźwiękowej należy prowadzić dokumentację według zaleceń producenta urządzenia pomiarowego ). Do zalecanych nieniszczących metod badania wykonanych spoin należą :

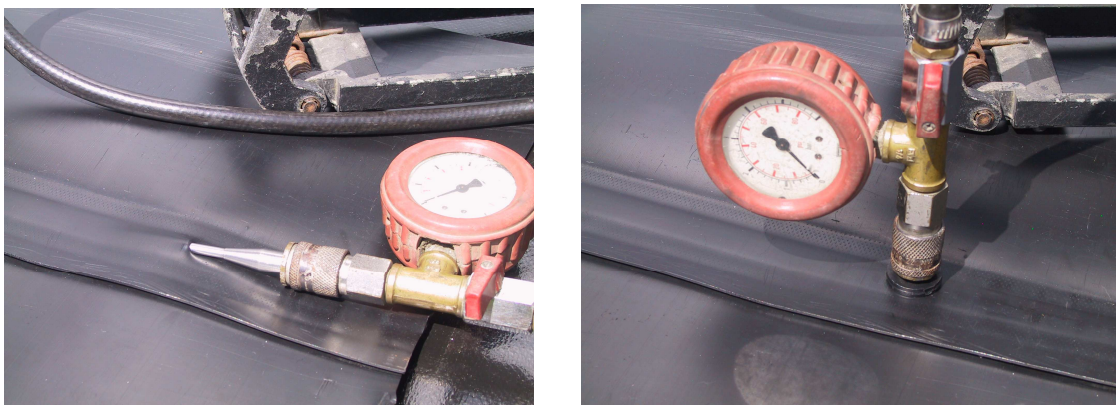
- metoda ciśnieniowa,
- metoda próżniowa,
- metoda ultradźwiękowa,
- metoda piezoelektryczna.

W przypadku zastosowania sensorowej metody ciągłej kontroli szczelności konstrukcji geomembrany, można zrezygnować z nieniszczących metod kontroli szczelności spoin. Zastosowanie metody sensorowej nie zwalnia jednak z konieczności przeprowadzenia niszczących badań wytrzymałościowych spoin.
Jeżeli stwierdzone zostało uszkodzenie spoiny, należy je zlokalizować, naprawić i sprawdzić nowe spoiny metodą próżniową. Jakiekolwiek naprawy geomembrany należy wykonywać na bieżąco, za pomocą tego samego materiału i tej samej technologii wykonywania spoin.
Na każdej budowie należy pobrać próbki do badań niszczących i przesłać je do niezależnego laboratorium w celu uzyskania oceny wytrzymałości wykonanych spoin. Z badań niszczących należy sporządzić protokół według wzoru w załączniku. Próbki należy pobierać po każdych 250 m wykonanych spoin. Liczba pobranych próbek nie powinna być jednak mniejsza niż trzy dla danego obiektu. Inspektor nadzoru powinien ściśle nadzorować załatanie otworów powstałych po pobraniu próbek i zbadanie jakości nowych spoin jedną z metod nieniszczących. Wyniki badań nieniszczących i niszczących wykonanych spoin powinny stanowić podstawę do odbioru wykonanego uszczelnienia.

## 3.5.Metody nieniszczące.

### 3.5.1.Metoda ciśnieniowa.

Metodę tą stosuje się do kontroli spoin dwuśladowych o długościach do 50 m. W przypadku spoin dłuższych należy podzielić je na krótsze odcinki. Badanie to polega na wywarciu ciśnienia wewnątrz kanału powietrznego rzędu 200 kPa. Jeżeli w ciągu 5 min. ciśnienia nie spadnie więcej niż 10 % spoinę uznaje się za szczelną.



Fot.9. Kontrola szczelności połączenia dwuśladowego za pomocą igły i nypla PE.

### 3.5.2.Metoda próżniowa.

Na wybrane losowo miejsca wzdłuż spoiny spawanej nakłada się przezroczysty klosz próżniowy i wytwarza się podciśnienie rzędu 3 – 4 kPa. Jeżeli w ciągu 5 – 1- sek. nie pojawią się na zwilżonej roztworem mydlanym powierzchni spoiny pęcherzyki powietrza, to spoinę można uznać za szczelną**.**

Fot.10. Aparatura do badań próżniowych.

### 3.5.3.Metoda ultradźwiękowa.

Spoinę można uznać za szczelną jeżeli daje się penetrować bez przeszkód i bez występowania echa pośredniego na dystansie odpowiadającym trzem grubościom geomembrany lub 10 mm. W ten sposób otrzymuje się potwierdzenie jednorodności wykonanego połączenia.

### 3.5.4.Metoda piezoelektryczna.

W tej metodzie wykorzystuje się ręczne urządzenia w kształcie pistoletu elektrycznego gdzie na końcówce mosiężnej uzyskuje się prąd o napięciu 10 – 50 kV.

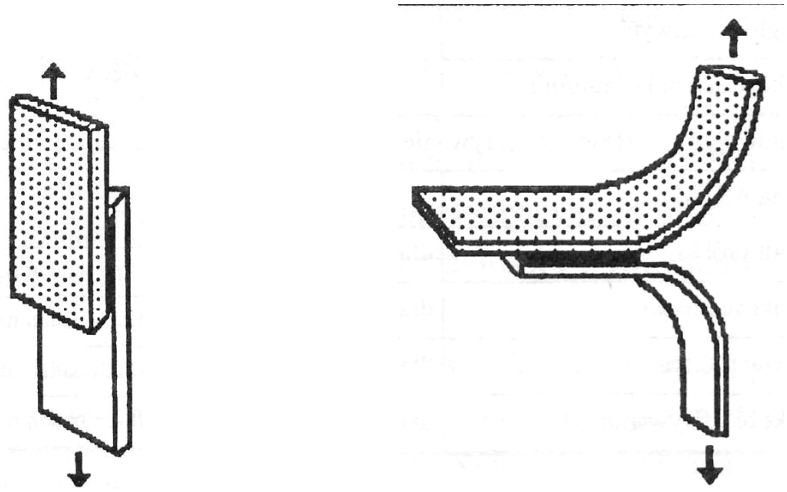
Fot.11. Pistolet piezoelektryczny.

Jeżeli w spoinie znajduje się jakakolwiek przerwa nawet mikronowa, to obserwujemy wytworzenie się charakterystycznego, niebieskiego łuku elektrycznego przepływającego przez ten punkt do podłoża. Najnowszą odmianą tej techniki jest wtopienie w spoinę bezpośrednio przed spawaniem ekstruderem cienkiego drutu miedzianego lub ze stali nierdzewnej, który podłącza się do napięcia rzędu 20 kV (ale o małym natężeniu). Jakakolwiek nieszczelność spoiny wywołuje alarm w przesuwanym nad spoiną detektorze.

### 3.6. Metody niszczące.

W tej metodzie wykorzystuje się zrywarki ręczne lub automatyczne z dodatkowym rejestratorem parametrów zrywania. Kryterium w tej metodzie jest pomiar wartości niszczącej siły dopuszczalnej i kształt spoiny w momencie zerwania.

- w badaniu na ścinanie – spoina powinna wykazać 90 % wytrzymałości geomembrany na rozciąganie przy płynięciu,
- w badaniu na odrywanie – spoina powinna wykazać 70 % wytrzymałości geomembrany przy płynięciu.



Rys.7. Schematy badań połączeń geomembran na ścinanie i rozrywanie. [14]

## 4. Odbiór robót uszczelnieniowych.

Zgodnie z przyjętymi zapisami w Normie odbiór wykonanej geomembrany powinien odbywać się w obecności przedstawicieli inwestora, wykonawcy geomembrany, nadzoru inwestorskiego, państwowego inspektora sanitarnego, inspektora ochrony środowiska i firmy wykonującej warstwę drenażowo – ochronną. Należy dokonać szczegółowego przeglądu całej wykonanej geomembrany, ze szczególnym zwróceniem uwagi na miejsca połączeń z elementami konstrukcyjnymi składowiska.
Podstawą odbioru geomembrany powinny być :

- projekt uszczelnienia,
- plan montażu geomembrany,
- wyniki badań nieniszczących spoin,
- wyniki badań niszczących spoin,
- protokoły odbioru elementów uszczelnienia,
- dziennik budowy.

## 5. Zalecenia końcowe.

Przy wykonywaniu uszczelnień z geomembrany należy przestrzegać przepisów bhp i przeciwpożarowych. Materiały, z których wykonana jest geomembrana, są łatwopalne i w trakcie palenia się wydzielają substancje toksyczne. Podczas wykonywania robót uszczelniających w pomieszczeniach zamkniętych ( zbiornikach ) należy zachować szczególna ostrożność w trakcie wykonywania spoin ze względu na możliwość ulatniania się substancji szkodliwych dla zdrowia. Szczególną uwagę należy zwrócić na zagrożenia w trakcie klejenia geomembrany do betonowego podłoża w pomieszczeniach zamkniętych.
Inwestor powinien otrzymać od projektanta geomembrany instrukcję eksploatacji uszczelnienia z geomembrany z zaznaczeniem:

- niedopuszczalnych działań na obiekcie,

- częstotliwości i dokumentowania przeglądów,
- zasad kontrolowania urządzeń obserwacyjnych,
- bezpieczeństwa pracy na obiekcie,
- kontroli przywożonych odpadów.

W instrukcji eksploatacji powinien być również zawarty sposób postępowania w przypadku stwierdzenia uszkodzeń systemu uszczelniającego.

# Literatura :


1. Adams M.W., Wagner N.: Forensic study of an HDPE liner. GFR 2000
2. Allan S. : Index puncture testing of geomembranes. GFR 2000
3. BS 8006:1995. Code of practise for strengthned/reinforced soil and other fills
4. Cadwallader M.: Enhancing geomembrane containment performance. GFR 2002
5. Cichy W. : Jakość wykonawstwa geomembran na składowiskach odpadów komunalnych i przemysłowych. Ekopartner 09/99
6. GSE : Das sensor – system für schadstellen – erkennung. Mat. informacyjne
7. Ivy N.: HDPE geomembrane after 20 years of service. GFR 2002
8. Jermołowicz P.: Budowa bezpiecznych wysypisk śmieci i składowisk odpadów przemysłowych. Konf. „Wysypiska i składowiska „ – Kołobrzeg 1992 r.
9. Jermołowicz P. : Technologia łączenia geomembran. Konf. Wysypiska i składowiska. Kołobrzeg 1993
10. Koerner R.M.: Designing with geosynthetics. (Fifth edition) Prentice Hall 2005
11. Martin J.P., Koerner R.M.: Geotechnical design considerations for geomembrane lined slopes : slope stability. Geotextiles and geomembranes vol. 2, 1985
12. Materiały informacyjne firm: SLT, Gundle, Naue-Fasertechnik, GSE , Atarfil, Pfaff, Leister, Herz, Wegener i Munsch
13. Michel P., Natrop J. : Trwałość użytkowania przy zgrzewaniu gorącym gazem. Konf. Budowa bezpiecznych składowisk odpadów. Gdańsk 1993
14. Młynarek J. [i in.] : Kontrola jakości złączy geomembran. Badania terenowe i laboratoryjne. Sem. Geotechniczne aspekty składowania odpadów. Gdańsk 1994
15. Phaneuf R., Peggs I.: Landfill construction quality. GFR 2001
16. PN-EN 13257:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne. Właściwości wymagane przy stosowaniu w budowie składowisk odpadów stałych.
17. PN – B – 10290 Geomembrany. Ogólne wymagania dotyczące wykonawstwa geomembran na budowie składowisk odpadów stałych.
18. Rollin A.L. [i in.] :Leak location in exposed geomembrane liners using an electricalleak detection technique. Proc of Geosynthetics Conf.MN 1993 (USA)
19. Rozporządzenie Min. Środowiska w sprawie szczegółwych wymagań dot. lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów. Dz.U. 61, poz.549 z 24.032003 r. (z późniejszymi zmianami)

# ZAŁĄCZNIKI

## PROTOKÓŁ

### odbioru materiału geomembrany na placu budowy

**I Dane dotyczące inwestycji**

1. Rodzaj i miejsce budowy .....
.....
2. Inwestor .....
3. Firma wykonująca geomembranę .....
4. Rodzaj i producent geomembrany

**II Dane dotyczące przewozu geomembrany**

1. Miejsce pobrania ładunku .....
2. Nazwisko(a) kierowcy(ów) .....
3. Numer(y) rejestracyjny(e) samochodu(ów) .....
.....

**III Dane dotyczące rozładunku i składowania**

1. Sprzęt używany do rozładunku geomembrany .....
   a) dźwig, podnośnik itp. .....
   b) rodzaj stropów i sposób podwieszania rulonów .....
.....
2. Liczba warstw rulonów geomembrany na samochodzie .....
3. Sposób składowania materiału .....

**IV Dane dotyczące stanu dostarczonego materiału**

1. Data i godzina dostarczenia materiału .....
2. Postać materiału (rulony, płyty) .....
3. Numery dostarczonych rulonów (płyt) .....
.....
4. Numer, data wystawienia i data ważności świadectwa systemu jakości producenta dla dostarczonej partii materiału .....
.....
5. Uwagi dotyczące uszkodzeń i przyczyn uszkodzeń poszczególnych rulonów (płyt), z podaniem numeracji
.....

| Inspektor nadzoru inwestorskiego | | Kierownik budowy | |
|---|---|---|---|
| *Imię i nazwisko* | *Podpis* | *Imię i nazwisko* | *Podpis* |

# PROTOKÓŁ

## wykonania próbnego zgrzewania (spawania) na budowie

**I Dane informacyjne**

1. Data i numer próby .....
2. Rodzaj i miejsce budowy .....
3. Inwestor .....
4. Firma układająca geomembranę .....
5. Operator sprzętu .....

**II Dane dotyczące sprzętu i geomembrany**

1. Rodzaj maszyny do wykonywania spoiny .....
2. Producent .....
3. Rodzaj i grubość geomembrany .....
4. Rodzaj wykonywanej spoiny .....

**III Dane dotyczące pogody i warunków wykonywania spoiny**

1. Temperatura otoczenia .....
2. Opady deszczu .....
3. Wiatr .....
4. Temperatura geomembrany .....
5. Temperatura zgrzewania (spawania) .....
6. Szybkość wykonywania spoiny .....
7. Nacisk na geomembranę .....

**IV Uwagi dotyczące oceny optycznej wykonanej spoiny**

.....
.....

**V Wyniki badań nieniszczących**

1. Próba ciśnieniowa: ciśnienie początkowe ..... kPa, spadek ciśnienia ..... kPa
2. Próba próżniowa: podciśnienie ..... kPa, nieszczelności ☐ tak ☐ nie

**VI Wyniki badań niszczących**

1. Średnia wytrzymałość spoiny ..... kN/m
2. Średnia wytrzymałość na odrywanie spoiny ..... kN/m
3. Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy płynięciu geomembrany ..... kN/m

**VII Akceptacja wykonanej spoiny**

My, niżej podpisani, akceptujemy sprzęt i jego operatora.

| Inspektor nadzoru inwestorskiego | | Kierownik budowy | |
|---|---|---|---|
| *Imię i nazwisko* | *Podpis* | *Imię i nazwisko* | *Podpis* |

# PROTOKÓŁ

## badania spoin metodą próżniową

**I Dane informacyjne**

1. Data i godziny wykonania próby .....
2. Rodzaj i miejsce budowy .....
3. Inwestor .....
4. Firma układająca geomembranę .....
5. Przeprowadzający badanie (*imię i nazwisko*) .....

**II Dane dotyczące sprzętu i spoin**

1. Rodzaj i marka komory próżniowej .....
2. Numer komory próżniowej .....
3. Rodzaj i grubość geomembrany .....
4. Rodzaj badanej spoiny .....
5. Podciśnienie w komorze próżniowej .....

**III Wyniki badań**

| Numer spoiny wg planu | Położenie miejsca badania | Położenie ewentualnych uszkodzeń | Data naprawy | Wynik ponownego badania |
|---|---|---|---|---|
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |

**IV Plan montażu geomembrany z zaznaczeniem miejsc przeprowadzonych badań (w formie załącznika)**

| Inspektor nadzoru inwestorskiego | | Przeprowadzający badanie | |
|---|---|---|---|
| *Imię i nazwisko* | *Podpis* | *Imię i nazwisko* | *Podpis* |

# PROTOKÓŁ

## badania spoin metodą ciśnieniową

**I Dane informacyjne**

1. Data i godziny badania (od – do) .....
2. Rodzaj i miejsce budowy .....
3. Inwestor .....
4. Firma układająca geomembranę .....
5. Przeprowadzający badanie (*imię i nazwisko*) .....

**II Dane dotyczące sprzętu i spoin**

1. Rodzaj i marka pompy ciśnieniowej .....
2. Rodzaj połączenia pompy ze spoiną .....
3. Rodzaj i grubość geomembrany .....
4. Sposób wykonania spoiny dwuścieżkowej .....

**III Wyniki badań**

| Numer spoiny wg planu | Długość spoiny | Ciśnienie początkowe | Procentowy spadek ciśnienia | Stwierdzenie uszkodzenia |
|---|---|---|---|---|
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |

**IV Plan montażu geomembrany z zaznaczeniem miejsc przeprowadzonych badań (w formie załącznika)**

| Inspektor nadzoru inwestorskiego | | Przeprowadzający badanie | |
|---|---|---|---|
| *Imię i nazwisko* | *Podpis* | *Imię i nazwisko* | *Podpis* |

# PROTOKÓŁ

## przeprowadzenia badań niszczących

**I Dane informacyjne**

1. Data i godziny badania (od – do) .....
2. Rodzaj i miejsce budowy .....
3. Inwestor .....
4. Firma układająca geomembranę .....
5. Laboratorium przeprowadzające badanie .....
6. Imię i nazwisko przeprowadzającego badanie .....

**II Dane dotyczące sprzętu i spoin**

1. Marka i typ maszyny wytrzymałościowej .....
2. Prędkość rozwierania uchwytów .....
3. Rodzaj i grubość geomembrany .....
4. Rodzaj badanej spoiny

**III Plan montażu geomembrany z zaznaczeniem miejsc pobrania próbek do badań niszczących (w formie załącznika)**

**IV Wyniki badań**

1. Wytrzymałość spoiny na ścinanie – nr próbki laboratoryjnej .....

| Badanie | Grubość geomembrany mm | Wytrzymałość przy niszczeniu N/mm | Opis zniszczenia próbki | Ocena badania |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |

1. Wytrzymałość spoiny na odrywanie – nr próbki laboratoryjnej .....

| Badanie | Grubość geomembrany mm | Wytrzymałość przy zniszczeniu N/mm | Opis zniszczenia próbki | Ocena badania |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |

Przeprowadzający badanie

*Pieczęć laboratorium* *Imię i nazwisko* *Podpis*

# PROTOKÓŁ

## odbioru wykonanej konstrukcji geomembrany

**I Dane informacyjne**

1. Data .....
2. Rodzaj i miejsce budowy .....
3. Inwestor .....
4. Firma układająca geomembranę .....

**II Osoby obecne**

| *Lp.* | *Imię i nazwisko* | *Firma* | *Stanowisko* |
|---|---|---|---|
| ..... | ..... | inwestor | ..... |
| ..... | ..... | wykonawca geomembrany | ..... |
| ..... | ..... | nadzór inwestorski | ..... |
| ..... | ..... | przedstawiciel PIOŚ | ..... |
| ..... | ..... | firma wykonująca warstwę drenażowo-ochronną | ..... |

**III Dokumenty niezbędne przy odbiorze**

1. Projekt uszczelnienia syntetycznego
2. Dziennik budowy
3. Protokoły (załączniki do niniejszej normy)
4. Plan montażu geomembrany
5. Gwarancje na piśmie udzielone przez producenta geomembrany
6. Gwarancje na piśmie udzielone przez firmę układającą geomembrany
7. Zdjęcia wykonanego uszczelnienia syntetycznego

**IV Zastrzeżenia poszczególnych realizatorów i nadzoru do sposobu ułożenia geomembrany**

1. Wymienić rodzaje zastrzeżeń i zgłaszającego
.....
.....
.....
.....
2. Termin usunięcia zgłaszanych usterek .....
3. Termin ponownego odbioru .....
4. Termin wykonania warstwy drenażowo-ochronnej .....

**V Przyjęcie uszczelnienia syntetycznego**

My, wyżej wymienieni, stwierdzamy własnoręcznym podpisem, że uszczelnienie syntetyczne w postaci geomembrany zostało wykonane bez zastrzeżeń do jakości wykonawstwa.

1. .....
2. .....
3. .....
4. .....
5. .....

*Miejscowość*

.....

*Data*

.....

# PROTOKÓŁ

## odbioru warstwy drenażowo-ochronnej geomembrany

**I Dane informacyjne**

1. Rodzaj i miejsce budowy .....
2. Inwestor .....
3. Firma układająca geomembranę .....
4. Firma wykonująca warstwę drenażowo-ochronną .....

**II Dane dotyczące warstwy drenażowo-ochronnej**

1. Warstwa ochronna z geowłókniny (rodzaj i gramatura) .....
2. Frakcje warstwy drenażowo-ochronnej (mm) .....
3. Grubość warstwy drenażowo-ochronnej (m) .....
4. Rodzaj i marka sprzętu poruszającego się po geomembranie .....
5. Naciski wywierane przez sprzęt na podłoże (kPa) .....

**III Warunki otoczenia w trakcie wykonywania warstwy drenażowo-ochronnej**

1. Temperatura otoczenia .....
2. Opady deszczu .....
3. Wiatr .....

**IV. Zastrzeżenia wykonawcy warstwy drenażowo-ochronnej**

Ja, niżej podpisany, uprawniony przedstawiciel firmy wykonującej warstwę drenażowo-ochronną, stwierdzam, że nie mam żadnych zastrzeżeń co do sposobu wykonania uszczelnienia w postaci geomembrany.

| *Data* | *Imię i nazwisko* | *Stanowisko* | *Firma* | *Podpis* |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

**V Potwierdzenie odbioru warstwy drenażowo-ochronnej**

My, niżej podpisani, uprawnieni przedstawiciele firm, stwierdzamy, że warstwa drenażowo-ochronna została wykonana zgodnie z projektem, w sposób nie powodujący uszkodzeń geomembrany.

| *Lp.* | *Imię i nazwisko* | *Firma* | *Stanowisko* | *Podpis* |
|---|---|---|---|---|
| ..... | ..... | nadzór inwestorski | ..... | ..... |
| ..... | ..... | firma układająca geom | ..... | ..... |
| ..... | ..... | firma wykonująca warstwę drenażowo-ochronną | ..... | ..... |