

### **3. УПЛЪТНЯВАНЕ НА СТРОИТЕЛНИТЕ ПОЧВИ. УПЛЪТНЯВАНЕ НА ПОВЪРХНОСТТА С ВАЛЯЦИ**

#### 1. Уводни бележки

Уплътняването на дисперсните почви се прилага с цел да се повиши тяхната носеща способност, да се намали слягането, да се избегне опасността от пропадане, да се съхрани устойчивостта на откосите на насипните съоръжения и да се понижи водопропускливостта. След дълго историческо развитие и усъвършенствуване (вж. гл. 2.2.) в днешни времена уплътняването е най-широко използвания метод за подобряване на строителните почви. Най-много уплътнена почва се използва в транспортното строителство, след него - в промишлено-гражданското, в хидротехническото, хидромелиоративното и други строителства. Независимо от големите техноложки различия на методите за уплътняване (Таблица 2.1), тях ги обединява сходството на процеса на уплътняване, който включва разрушаване на естествената структура и създаване на нова структура на почвата с по-малък обем на порите, с по-голямо съпротивление на срязване и по-висок модул на обща деформация.

Процесът на уплътняване може да протече под действие на статични или динамични сили, според което методите са разделени на две подгрупи.

#### 2. Уплътняване с валяци. Същност на метода

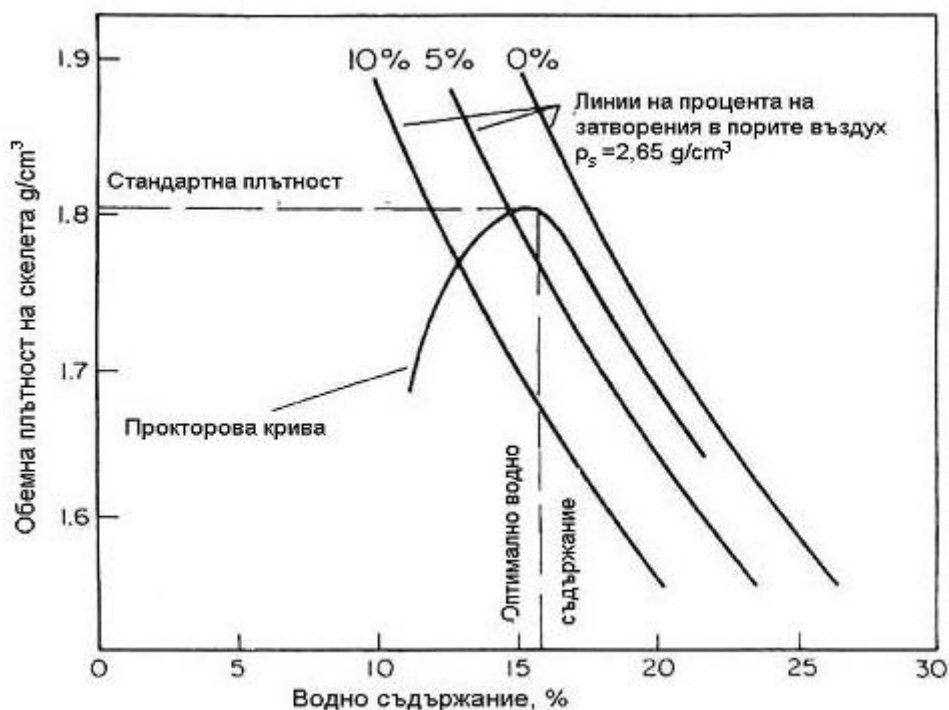
Използува се при изграждане на пътни насипи и пътна основа, на земнонасипни язовирни стени, на обратни насипи и др. Осъществява се чрез последователно разстилане на слоеве почва и тяхното уплътняване. В резултат на приложение на моментни сили се постига намаляване на обема на порите и по-плътното подреждане на почвените частици. Обемът на порите се намалява чрез изтласкване на въздуха без съществено изменение на водното съдържание, но с нарастване на степента на водонасищане. Обаче, всичият въздух от порите не може да бъде изтласкан, така че практически не се постига пълно водонасищане. Независимо от това, вследствие на намаляване на обема на порите почвата до голяма степен става неподатлива към допълнително навлажняване.

Ефективността на уплътняването с валяци зависи от състава на почвата, от дебелината на слоевете, от количеството на уплътнителната работа и от водното съдържание. Глинестите почви се уплътняват по-трудно при повишени изисквания към техноложките операции. Максималната дебелина на разстлания слой се определя според вида на валяка, като се изисква равномерно уплътняване в дълбочина.

Ефектът от уплътняването силно зависи от водното съдържание  $w$ . Ако  $w$  е ниско, увеличаването на уплътнителната работа води до по-плътното подреждане на частиците, но поради увеличаване на триенето между тях ефектът от уплътняването става все по-малък. При увеличаване на  $w$  намалява триенето между частиците, така че почвата става по-

уплътняема, като нараства обемната плътност на сухата маса и намалява обема на въздуха в нея. При по-нататъшно нарастване на  $w$ , обаче, се увеличава порния натиск, възпрепятстващ ефекта на уплътнителните сили. На практика валякът изтласква почвата пред себе си и не може да я уплътни.

Съществува водно съдържание, различно за всеки вид почва, при което при дадена уплътнителна работа се постига най-висока плътност и съответно най-добри физични и механични показатели на уплътнената маса. Това е установено най-напред от американския инженер Проктор в началото на тридесетте години. Той е изследвал зависимостта между обемната плътност на сухата маса  $\rho_d$  и водното съдържание  $w$  при еднаква уплътнителна работа, като е установил, че съществува максимум в кривата, описваща тази зависимост, от който може да се намери, най-подходящото, т.е. оптимално водно съдържание  $w_{opt}$ , при което се постига най-високата плътност или така наречената стандартна плътност  $\rho_{ds}$  (фиг. 3.1.).

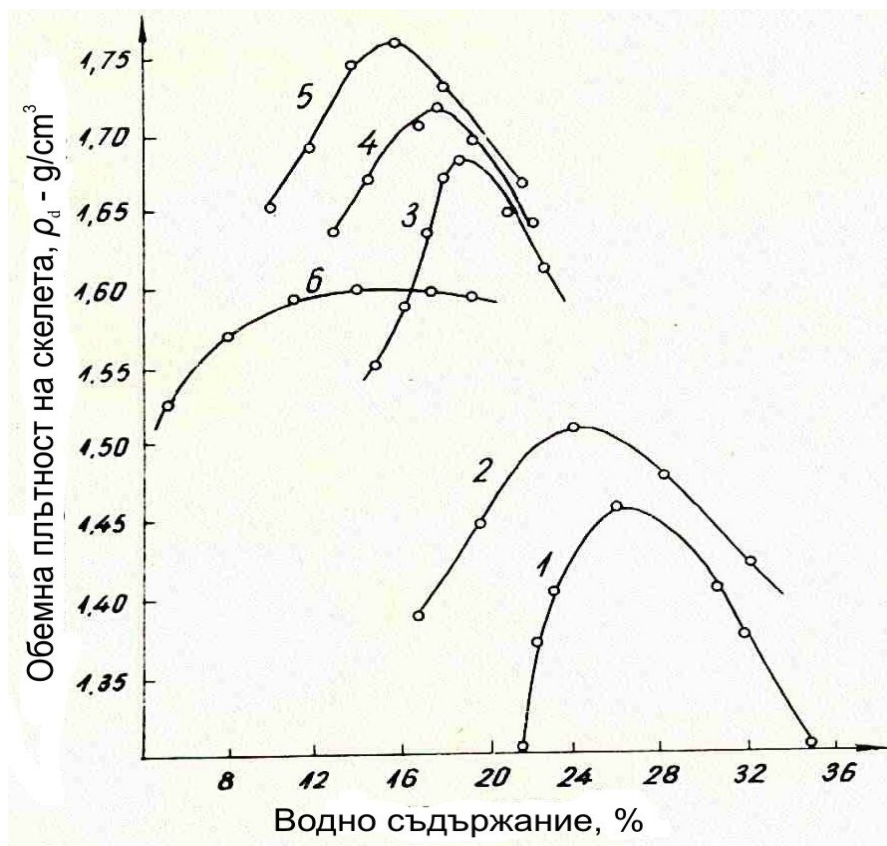


Фиг. 3.1. Зависимост "плътност – водно съдържание" при стандартна уплътнителна работа

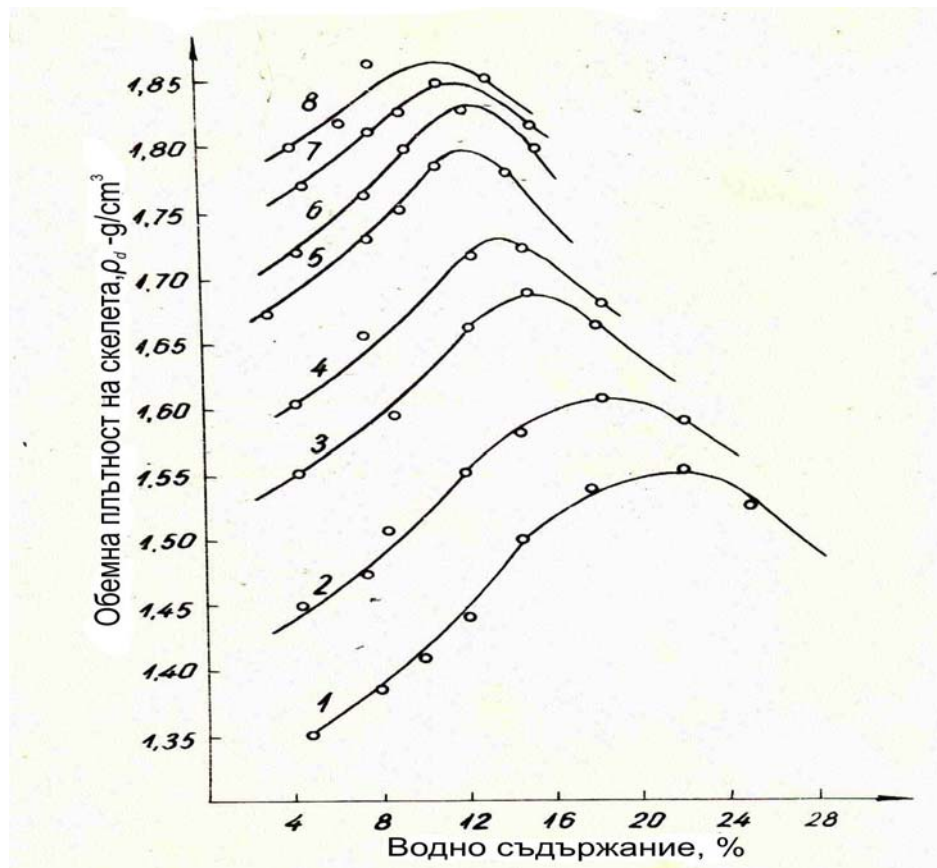
Стойностите на  $w_{opt}$  и на  $\rho_{ds}$ , както и характера на прокторовата крива зависят от вида почвата (фиг. 3.2.). Глинестите почви имат високо  $w_{opt}$  и по-ниско  $\rho_{ds}$ , в сравнение с праховите и пясъчливите (сравни кривите 1 и 2 с 3, 4, 5 и 6 на фиг. 3.2.). При пясъчливите почви след достигане на  $\rho_{ds}$  стойността му се запазва с увеличение на  $w$  над  $w_{opt}$  (крива 6 на фиг. 3.2.).

С увеличаване на уплътнителната работа намалява  $w_{opt}$  и нараства  $\rho_{ds}$  (фиг. 3.3.). На практика обаче, уплътнителната работа не може да се увеличава до такива големи стойности, каквито се постигат в

лабораторията. Затова  $w_{opt}$  и  $\rho_{ds}$  се определят посредством стандартизиран лабораторен опит, който взема предвид теглото на валяците и зърнометричния състав на почвата. У нас лабораторният опит се прави по стандарта БДС 17146-90, при който се прилага нормална и усилена уплътнителна работа.



Фиг. 3.2. Прокторови криви на различни строителни почви: 1-глиненска глина от “Марица –изток”; 2- органична глина “смолница” от Софийско; 3- песъчливо – прахова делувиална глина; 4- типичен прахов льос, дълб. 1,5 m; 5- типичен прахов льос, дълб. 6,5 m; 6- песъчлив льос



Фиг. 3.3. Изменение на  $w_{opt}$  и  $\rho_{ds}$  с увеличаване на статичното уплътняване  $p$  при прахов льос: 1 -  $p=0,5$  МПа; 2 -  $p=1$  МПа; 3 -  $p=2,0$  МПа; 4 -  $p=4,0$  МПа; 5 -  $p=6,0$  МПа; 6 -  $p=9,0$  МПа; 7 -  $p=13,0$  МПа; 8 -  $p=18,0$  МПа

През втората половина на миналия век са извършени изследвания върху уплътнителните характеристики на българските почви (Генчев, 1957; Евстатиев, 1969; Бойдев, 1973; Бойдева, 1977). От тях са установени осреднени стойности за  $w_{opt}$  и за физичните и механични показатели при някои характерни български дисперсни почви (Таблица 3.1. и Таблица 3.2.).

Таблица 3.1. Стойности на  $w_{opt}$  при различни почви

№	Вид почва	$w_{opt}$ , %
1	пясък	8-13
2	глинест пясък	9-15
3	песъчлива глина	12-18
4	глина	16-26
5	песъчлив льос	12-14
6	типичен льос	14-16
7	глинест льос	18-21

Таблица 3.2. Осреднени физико-механични показатели на уплътнени  
лъсови почви

№	Показатели	Типичен и слабо песъчлив лъос	Глинест лъос
1	Оптимално водно съдържание - $w_{opt}$ , %	13-16	18-21
2	Стандартна плътност $\rho_{ds}$ , g/cm <sup>3</sup>	1,64 – 1,70	1,68 – 1,78
3	Кохезия, $c$ , МПа	0,025 – 0,050	0,050 – 0,10
4	Ъгъл на вътрешно триене $\phi$ , degree	26 - 33	20 - 24
5	Модул на обща деформация $E_0$ , МПа	15-18	16-25
6	Модул на еластичност $E$ , МПа	30-35	35-40
7	Компресионен модул $M$ , МПа	8-12	10-18
8	Коефициент на филтрация $k$ , m/s	$10^{-7} - 10^{-8}$	$10^{-8} - 10^{-9}$

Прокторовата крива е привличала вниманието на изследователите, които са предлагали различни обяснения за нейния характер. Проктор прилага представите на т.н. “капилярна теория”, доминираща през тридесетте години в земната механика. Според него увеличаването на  $\rho_d$  до достигане на  $w_{opt}$  се обяснява с намалението на капилярните сили, които в началото на опита при ниските водни съдържания поддържат съпротивлението на почвата срещу проникването на уплътняващата тежест. При по-високи водни съдържания капилярният ефект се загубва и започва смазващото действие на водата, което е най-силно изразено при  $w_{opt}$ . След това водата с нейната ниска плътност заема все по-малка част от обема и  $\rho_d$  намалява. Впоследствие срещу универсалното приложение на капилярната теория бяха направени сериозни възражения, включително и за обяснение на прокторовата крива.

Американските изследователи Хогентоглер и Лемб за обяснение на прокторовата крива приложиха представите на колоидната химия и на физикохимията. Според първия автор, с увеличение на водното съдържание се уголемяват двойните дифузни слоеве и се намалява вискозитета на свързаната вода, което улеснява уплътняването. Лемб също така използва теорията на двойния дифузен слой. При ниски водни съдържания този слой е малък, а концентрацията на електролита висока, което обуславя възникване на безпорядъчна флокулационна структура, притежаваща по-малка плътност. С увеличаване на водното съдържание намалява електролитната концентрация и подреждането на частиците

става все по-добро, докато се достигне до  $w_{opt}$ . По-нататък с увеличаване на  $w$  частиците се раздалечават поради нарастване на двойните слоеве и плътността намалява. Според сегашните схващания познанията на колоидната химия и на физикохимията могат да допълват представите за якостта на почвите, но с тях единствено не може да се обясни както природата на якостта, така и зависимостите от типа на прокторовата крива.

В по-ново време при обяснението на природата на якостта и уплътняемостта на почвите доминират представите на теорията за ефективните напрежения (Bell, 1993). Според тези представи при ниско водно съдържание съществува отрицателен порен натиск, който поддържа високи ефективни напрежения в почвата. С повишаване на водното съдържание при еднаква уплътнителна работа нараства степента на водонаситеност, намалява количеството на въздуха в порите, порният натиск постепенно се изменя в положителна посока. Намаляват ефективните напрежения в контактите между частиците и приложената уплътнителна работа предизвиква повишаване на плътността, докато се достигне до  $\rho_{ds}$ . Когато се стигне до състояние близко до водонаситеното при  $w_{opt}$ , порният натиск възпрепятствува по-нататъшното уплътняване.

### 3. Проектиране и приложение на уплътняването с валици

Този вид уплътняване е развит най-много в пътното строителство, където е основен метод за повишаване на устойчивостта на земното легло, на пътния насип и на самата пътна настилка. Обикновено уплътняването се извършва на слоеве с дебелина 20-35 cm.

Методът е прилаган от дълго време в строителството и е натрупан значителен опит в избора на подходящи почви за различните приложения. Най-голяма плътност и висока товароносимост се постига при грубозърнестите почви, съдържащи известни количества пясъчна и глинеста фракция, които по състав са близки с т.н. оптимална зърнометрична смес. Тези почви лесно се уплътняват и не губят носещата си способност под действие на климатичните фактори. Добри насипи се правят и от пясъчливи глини с ниско съдържание на органично вещества и от широко разпространените в България льосови почви. При тях трябва да се вземат мерки срещу ерозия на откосите – най-често чрез затревяване или залесяване и срещу преувлажняване на долната част на насипа. Не са подходящи за насипи глините с висок показател на пластичност и почвите с голямо органично съдържание.

Качеството на уплътняване се контролира чрез вземане на проби от уплътняваните слоеве за определяне на  $w$  и на обемната плътност на скелета  $\rho_d$ . За целта могат да се използват и неутронни плътномери. За ефекта от уплътняването се съди по т.н. коефициент на уплътняване  $K_y$ , който представлява отношението между обемната плътност  $\rho_d$ , постигната на обекта и определената в лабораторията стандартна плътност  $\rho_{ds}$ , т.е.

$$K_y = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}} \quad (3.1)$$

Стойността на коефициента  $K_y$ , се изменя от 0,90 до 1,0 в зависимост от типа на съоръжението и се дава в проекта. При хидротехническите земни съоръжения  $K_y=0,97-1,0$ , подобни стойности се препоръчат при уплътняване на земното платно на магистралите, пътищата от първа категория и при железопътните насипи. При обратните и подравнителни насипи в промишленото и градското строителство  $K_y=0,90-0,95$ .

Видът на уплътнителните машини зависи от площта и обема на уплътняваната почва. Уплътняването в пътното строителство се извършва с валяци, които биват три вида – с гладки барабани, с пневматични гумени колела и юмручни валяци (валяци кози крак). Първите два вида валяци се използват при свързани и несвързани почви. При глинестите почви най-добър резултат се получава с пневмоколесните валяци. Валяците кози крак намират приложение при уплътняване на нераздробени среднопластични почви.

Валяците имат тегло от 0,5 до 100 и повече тона, и могат да работят при статичен и динамичен режим. Динамичното уплътняване дава най-добър резултат при несвързаните почви. Показател за уплътнителната способност на валяците е относителното налягане на ивица от 1 cm по ширината на барабана. При леките валяци то е до 2,5 МПа, при средните достига до 8,0 МПа, а при тежките надхвърля 12,0 МПа.

За достигане на необходимото уплътняване са необходими определен брой минавания на валяка по една и съща следа. За целта при насипи с голям обем се изгражда опитен участък. Обикновено, участъкът се прави на един от първите слоеве на насипа и има дължина 40-50 m и ширина 10-15 m. След всяко преминаване на валяка се вземат проби за определяне на обемната плътност и на водното съдържание. Пробите се обират не от повърхността, а от средата на уплътнявания слой. След достигане на проектния  $K_y$  се прави контролно измерване на дебелината на уплътнения слой и от повърхността в дълбочина на слоя се вземат нови проби за плътност и водно съдържание, за да се докаже, че плътността в долната му част е както на повърхността и водното съдържание съответства на  $w_{opt}$ . Последното контролно измерване не всякога се прави и затова много от нашите насипи имат “структура на сандвич” – между добре уплътнени слоеве са разположени слоеве, които имат по-ниска плътност. Броят на преминаванията на валяка се счита достатъчен, когато е достигнат проектния  $K_y$  за цялата дебелина на слоя. Тъй като лабораторният опит за определяне на стандартната плътност не винаги отразява конкретната обстановка, след обобщаване на данните от опитния участък може да се направи аргументирано предложение за коригиране на  $\rho_{ds}$  и на  $w_{opt}$ .

В зависимост от предназначението на насипа на опитния участък могат да се извършват щампови натоварвания за определяне на модула на обща деформация  $E_o$  и на модула на еластичност  $E$ , както и да се вземат

проби за лабораторно определяне на съпротивлението на срязване и коефициента на филтрация. Последните изпитвания се правят при изграждане на земнонасипни стени.

*Примери с не добре уплътнени насипи у нас*

Поради разчленения релеф в нашата страна ж.п. линиите имат голям брой насипни участъци. В планинските и полупланински райони насипите се изграждат с подходящи за целта грубозърнести почви и не създават проблеми на експлоатацията. Обаче в плиоценските и мергелни равнинни терени за насип се разполага с глинести почви, които по принцип могат да се използват, но с повишени изисквания към технологията на уплътняването и при вземане на съответни мерки. В такива почви преминава ж.п. линията София-Варна в участъците Червен бряг-Плевен, Попово-Дралфа, Дралфа –Търговище и др; ж.п. линиите Стара Загора-Димитровград, Перник- Волуяк, Дупница-Бобов дол и други. Над 100 на брой участъци от недобре изградени насипи представляват слаби места на ж. п. линията.

При насипите от мергелни и плиоценски глинени главно причина за неустойчивостта на насипите е следната. Глините се копаят в кариери с багер и във вид на едри буци, примесени с по-дребен материал се разстилат на слоеве. В такова състояние глината се уплътнява сравнително добре само в най-горната част на слоевете. В средната и долната им части между буците остават празни пространства. С течение на времето насипът постепенно се навлажнява в дълбочина с вода, постъпваща от баластровата призма. Под действие на динамичното натоварване на преминаващите влакове настъпва допълнително уплътняване, понякога придружено с изтласкване в страни. Баластровата призма следва слягането и за да се поддържа котата на коловозите непрекъснато се донасипва. На места нейната дебелина надхвърля два метра (фиг. 3.4.) без това да създаде сигурност в движението - влаковете по подобни насипи преминават със скорост 20-40 km в час. Динамичните пенетрационни опити показват, че леглото под баластровата призма е много слабо. До дълбочина 1,25 m  $N_{10}=2-3$ , което е недопустимо ниска стойност за един железопътен насип (фиг. 3.5.). Това пречи за модернизирането на железниците, въпреки че се изразходват огромни суми за ежегоден ремонт.

Големи проблеми създава лошокачественото изпълнение на обратните насипи около сградите, изградени в лъос. Те обикновено не се уплътняват и стават лесен проводник на повърхностни води в земната основа, което предизвиква пропадане на фундаменти.

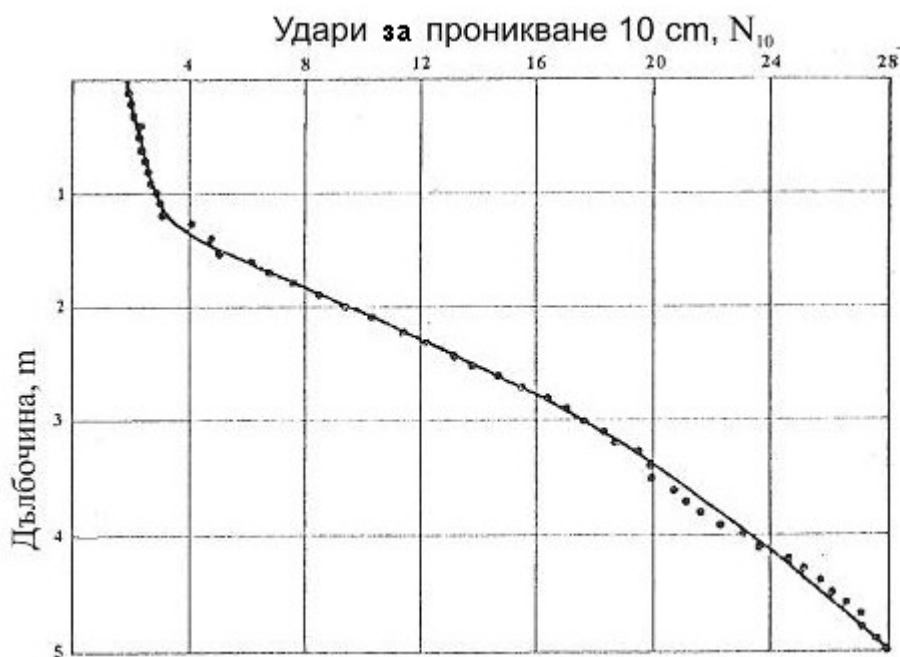
Недоброт уплътняване на почвата при вертикалната планировка е причина за деформации по уличните платна, тротоарите и при сгради, изградени в склон, в полуизкоп и полунасип. При отсъствие на обща стоманобетонна плоча, слягането на насипа предизвиква възникване на пукнатина на границата с естествената почва, която пресича цялата сграда.





Фиг. 3.4. Удебелена баластрова призма вследствие на слягане на неуплътнен насип по жп-линията Дралфа-Търговище.

*По проект баластровата призма трябва да е 60-70 см, но поради слягане на насипа е надхвърлила 2 м. Виждат се разкривените стълбове поради деформациите на почвата под баластровата призма*



Фиг. 3.5. Осреднена крива за  $N_{10}$  от динамични пенетрации в недобре уплътнен жп-насип