

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİLTLERDE SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİNDE YANAL
KONSOLIDASYON ÖZELLİĞİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Mehmet TAPAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK

Eylül 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLTLERDE SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİNDE YANAL
KONSOLİDASYON ÖZELLİĞİNİN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Mehmet TAPAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Bu tez 14 / 09 /2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Akın ÖNALP
Üye


Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT
Üye

ÖNSÖZ

Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu araştırmada siltli zeminlerin gerilme artışı altında gösterdiği sönümlenme davranışının sıvılaşıma ile ilişkisi ele alınmıştır.

Birlikte çalışmaya başladığımdan beri hiçbir zaman her türlü destek ve emeğini esirgemeyen hocam Yrd. Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince yardımlarını gördüğüm Sakarya Üniversitesi öğretim üyeleri Yrd. Doç. Dr. Ertan BOL, Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT, Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvar sorumlusu Recep EYÜPLER'e sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca tezim için gerekli deneylerimin bir bölümünü İstanbul Kültür Üniversitesi laboratuvarında yapmama olanak sağlayan sayın Prof. Dr. Akın ÖNALP hocama sonsuz teşekkür ederim.

Beni eğitim ve öğretim hayatım boyunca destekleyen annem Hanife TAPAN, babam Numan TAPAN , kardeşlerim Fatma , Öznur , Fatih TAPAN'a ve ayrıca YAZ ve TAPAN ailelerine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
FOTOĞRAFLAR LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
ZEMİNLERİN SIKIŞMASI VE KONSOLİDASYON.....	2
2.1. Sıkışma ve Konsolidasyon.....	3
2.2. Zeminin Sıkışabilirliği.....	4
2.3. Konsolidasyon Süreci.....	5
2.4. Bir Boyutlu Sıkışma ve Konsolidasyon.....	6
2.5. Sıkışma Katsayısı ve Sıkışma İndisi.....	10
2.6. Radyal Konsolidasyon Teorisi.....	12
BÖLÜM 3.	
SİLTlerin DİNAMİK DAVRANIŞI.....	14
BÖLÜM 4.	
RADYAL KONSOLİDASYON.....	16

4.1. Hidrolik Hücrede Sönümlenme.....	19
4.1.1. Deney prosedürü.....	20
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMA.....	22
5.1. Numune Hazırlama.....	22
5.2. Fiziksel Deneyler	28
5.3. Hidrolik Hücrede Sönümlenme Deneyleri.....	30
5.4. Deney Sonuçlarının Adapazarı Kriteri Açısından İncelenmesi	32
5.5. Sönümlenme Deney Sonuçları	33
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	38
KAYNAKLAR ..	40
EKLER.....	42
EK I.a. Dane Boyutu Dağılım Eğrileri (Pipet).....	42
EK I.b. Dane Boyutu Dağılım Eğrileri (Hidrometre)	42
EK II. Sönümlenme Eğrileri.....	45
ÖZGEÇMİŞ	87

SİMGELER LİSTESİ

B	: Boşluk Suyu Basıncı Parametresi
C_c	: Sıkışma İndisi
C_v	: Düşey Konsolidasyon Katsayısı
C_h	: Yatay Konsolidasyon Katsayısı
C_r	: Radyal Konsolidasyon Katsayısı
E	: Boşluk Oranı
E	: Elastisite Modülü
k_v	: Düşey Geçirimsizlik Katsayısı
k_h	: Yatay Geçirimsizlik Katsayısı
m_v	: Hacimsel Sıkışma Katsayısı
OCR	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
S_i	: Ani Oturma
S_∞	: Konsolidasyon Oturması
u_w	: Boşluk Suyu Basıncı
V	: Toplam Hacim
w	: Su İçeriği

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Zeminlerde yükleme ve boşaltma süresince sıkışma ve şişme modeli.....	3
Şekil 2.2. İri ve ince daneli zeminlerde konsolidasyonun zamanlarda gelişimi.....	5
Şekil 2.3. Değişmez gerilme altında konsolidasyonun zamanla gelişimi.....	6
Şekil 2.4.a. Doygun bir zemin elemanı.....	7
Şekil 2.4.b. Doygun zeminde tek boyutlu sıkışma.....	7
Şekil 2.5. Zemin elemanında akım.....	8
Şekil 2.6. Sıkışabilir bir zemin için ideal boşluk oranı – efektif gerilme ilişkisi	11
Şekil 2.7. Radyal drenaj durumu.....	12
Şekil 4.1. Hidrolik konsolidasyon hücresi deney sistemi.....	16
Şekil 4.2. Hidrolik hücre drenaj ve yükleme durumları.....	18
Şekil 4.3. Rowe hücresi sönümlenme deneylerinde kullanılan deney düzeneği	20
Şekil 5.1. t_{50} ile hesaplanan radyal konsolidasyon katsayısı değerleri	36
Şekil 5.2. t_{90} ile hesaplanan radyal konsolidasyon katsayısı değerleri	36

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Hidrolik hücre konsolidasyon deneylerinde ölçek katsayıları.....	19
Tablo 5.1. Karışım numuneleri fiziksel özellikleri.....	28
Tablo 5.2. Adapazarı kriteri açısından numunelerin incelenmesi.....	33
Tablo 5.3. Radyal konsolidasyon zaman faktörleri.....	34
Tablo 5.4. Sönümlenme deney sonuçları	35

FOTOĞRAF LİSTESİ

Foto 4.1. Rowe laboratuvar sönümlenme deneyleri düzeneğinden bir görünüş	21
Foto 5.1. Numunenin el arabasıyla laboratuvara taşınması.....	22
Foto 5.2. Numunenin çökeltme havuzuna alınması	23
Foto 5.3. Numunenin 40 nolu elekten elenmesi ve karıştırılması.....	23
Foto 5.4. Su ile birlikte karıştırılan numunenin 5 dk çöktürülmesi.....	24
Foto 5.5. Santrifüjle kilin büyük havuza pompalanması.....	24
Foto 5.6. Silt – kum karışımından siltin yıkama eleme yöntemiyle elde edilmesi	25
Foto 5.7. Etüvden alınan siltin masa üzerine serilip kurutulması.....	26
Fot 5.8. Kurutulan siltin harman yapılması.....	26
Fot 5.9. Su ilave edilen numunenin karıştırılması.....	27
Foto 5.10. Numuneye vakum uygulama.....	27
Foto 5.11. Çarpmalı alette (Casagrande) likit limit deneyi.....	29
Foto 5.12. Koni düşürme deneyi.....	29
Foto 5.13. Özgül ağırlık deneyi numuneleri.....	29
Foto 5.14. Hidrometre deney numuneleri.....	30
Foto 5.15. Rowe hücresine numune yerleştirme ve deney düzeneği.....	31
Foto 5.16. Rowe hücresi deney sonu numune boyu ölçme.....	31
Foto 5.17. Deney sonu numune tartımı ve etüve konulması.....	32

ÖZET

Anahtar kelimeler: Hacim değişimi, Silt, Yanal konsolidasyon katsayısı, Sıvılaşma, Hidrolik hücre (Rowe)

Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu araştırmanın amacı, siltli zeminlerde hacim değişimi davranışının deneysel olarak gözlemlenerek siltli zeminlerin konsolidasyon katsayısının hidrolik hücre ile belirlenmesi ve sıvılaşma ile olası ilişkisinin incelenmesidir. Bu amaçla, Adapazarı kentinden alınan siltli zemin numunesinin içerdii silt boyutundaki daneler ayıklanarak içerisine belirli oranlarda kil numunesi ilavesi ile hidrolik hücrede konsolide edilip sönümlenme deneyleri yapılmıştır.

Elde edilen numunelerin ayrıca fiziksel özellikleri ölçülmüş, çarpmalı alet ve koni düşürme ile likit limit değerleri, plastik limit değerleri, özgül ağırlık değerleri, hidrometre ve pipet analizi ile dane dağılım eğrileri elde edilmiştir. Sönümlenme deneylerinden belirlenen yanar konsolidasyon katsayısı değerleri numunelerin Adapazarı Kriteri ile belirlenen sıvılaşma potansiyelleri açısından değerlendirilmiştir.

EFFECT OF RADIAL CONSOLIDATION PROPERTIES ON THE LIQUEFACTION POTENTIAL OF SILTS

SUMMARY

Keywords : Volume change, Silt, Radial consolidation coefficient, Liquefaction, Hydraulic cell (Rowe)

The aim of this research, which has been done as an MBA thesis in Geotechnic Programme in Civil Engineering Department, University of Sakarya, is to do a study on identifying consolidation coefficient of silt grounds and the possible relation with liquefaction by observing the volume change behaviour in silt grounds.

With this aim, particles in silt dimension have been cleaned out of silt ground sample from Adapazari, a certain proportion of clay sample has been added and dissipation experiments are done by consolidating those particles in hydraulic cell.

The samples gained have been physically measured, liquid limit values, plastic limit values, heat specific weights have been acquired via casagrande and cone penetration and particle distribution curves have been acquired via hydrometer and pipette analysis.

Lateral consolidation coefficients identified via dissipation experiments have been evaluated in terms of liquefaction potentials which were identified in Adapazari criteria of the samples.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bilindiği gibi siltlerin sıvılaşılabirliği son yirmi yıldır önemli bir çalışma konusu olmuş, Sakarya Üniversitesi'nde de bu konu üzerine yoğun emek verilmiştir. Siltlerde boşluk suyu basıncının sönümlenme özelliğinin sıvılaşıma potansiyelinin tespitinde değerlendirilmesi bu çalışmanın konusu olmuştur.

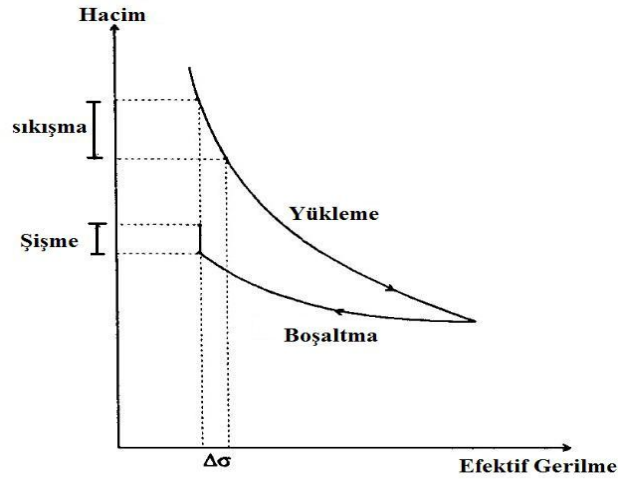
Ödometrede konsolidasyon ölçümünün getirdiği bazı eksiklikleri bertaraf etme amacıyla 1960'lı yıllarda geliştirilen hidrolik hücre (Rowe hücresi), zeminlerin sıkışabilirliğinin daha iyi koşulların kontrol edilebildiği bir deneyde ölçülmesi fikrinden ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada zeminlerin sönümlenme özelliğinin ölçümünde hidrolik hücreden yararlanılmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler, likit limitin 1.5 katı su muhtevasında hazırlanan zemin bulamacının, hidrolik konsolidasyon hücresinde konsolide edilmesiyle hazırlanmıştır. Laboratuvarda oluşturulan bu numuneler aynı hidrolik hücre içinde düşey gerilme altında konsolide edilirken boşluk suyu basıncı okumaları alınmış ve sönümlenme eğrileri elde edilmiştir. Bunun yanında numunedeki fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesi hücre cidarına yerleştirilen geçirimli süzgeç elemanı vasıtasıyla dışa doğru yanal konsolidasyon şeklinde oluşturulmuş olup bu sayede numunelerin yanal konsolidasyon özellikleri belirlenmiştir. Bu çalışmada güncel bilgiler ışığında sıvılaşıma potansiyeli tespit edilen bu numunelerin yatay konsolidasyon özelliklerinin sıvılaşıma açısından irdelenmesi yapılmıştır.

BÖLÜM 2. ZEMİNLERİN SIKIŞMASI ve KONSOLİDASYON

Cisimler yüklendiklerinde şekil değiştirme özelliği gösterirler. Birçok mühendislik gereci kabul edilebilir düzeydeki bir mutlak gerilme noktasına kadar Hooke yasasına uyar. Örneğin, çeliğin akma sınırına dek gerilme-şekil değiştirme davranışı gerçekte bir doğruyla temsil edilir, elastik sınır içinde yük boşaltıldığında şekli eski haline döner. Beton bir dereceye kadar benzer davranır, ancak gerilme-şekil değiştirme ilişkisi doğrusallıktan yoksundur. Zeminler için, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi zeminin cinsiyle değişmekle beraber, zamanın önemli rol oynadığı ince daneli zeminlerde, genellikle karmaşıktır. Zeminin bu zaman ilişkili şekil değiştirmesi (konsolidasyon) özellikle ince daneli zeminlerde oturma hesabında kullanılmaktadır.

Temel oturmalarının hesabı geoteknik mühendisinin önemli problemlerinden biridir. İtalya'da Pisa kulesi, Mexico City'deki Güzel Sanatlar Binası ve Latin Amerika Kulesi gibi yapılar mimari özellikleri ile değil oturma özellikleri ile tanınırlar. Geçmişte birçok yapı aşırı oturma sonucu olarak işlev göremez hale gelmiştir. Gerçekten farklı tahmin edilen oturma sonucu oluşabilecek hasarlar geoteknik mühendisleri için çözülmesi gerekli bir problemdir.

Oturma yer altı su seviyesindeki düşüş, titreşim gibi etkilerle de oluşmasına rağmen genellikle dış yükleme nedeniyle belirmektedir. Tipik olarak, lineer olmamakla beraber gerilmenin artmasıyla oturma büyüklüğü artmaktadır. Örneğin, zemin yüzeyine uygulanan herhangi bir yükün sonucu olarak temel altında oturmalar tahmin edilebilmektedir. Bunun yanında kazı ve yer altı su seviyesindeki yükselişten dolayı efektif gerilmedeki azalış gibi nedenlerle yükün kalkması durumunda ise şişme veya kabarma meydana gelebilir. Şekil 2.1'deki tam doğrusal olmayan ve geri dönmeyen özellikteki sıkışma gerçek bir zeminin sıkışma davranışını temsil etmektedir (Cernica, 1995).



Şekil 2.1. Zeminlerde yükleme ve boşaltma süresince sıkışma ve şişme modeli (Cernica, 1995)

2.1. Sıkışma ve Konsolidasyon

Boşluk suyunda oluşan fazla basıncın sönmülmesi ile zemindeki hacim değişiminin zamana bağlı ilerlemesi konsolidasyon olarak bilinir. Zemin hacmi ve efektif gerilme arasındaki zamandan bağımsız ilişki ise sıkışma olarak tanımlanır. Doymun zeminlerde geçerli olduğu kabul edilen efektif gerilme ilkesine göre, zemin hacmindeki değişim sadece efektif gerilmedeki değişimden dolayı meydana gelmektedir. Bunun anlamı, bir zeminin hacmi değişmişse almakta olduğu efektif gerilmenin mutlaka değişmiş olduğu biçiminde açıklanabilir. Zemin daneleri ve su sıkışmaz kabul edildiğinden doymun bir zeminin hacmi sadece boşluklardan suyun uzaklaşması durumunda azalmaktadır. Bir zemin kütesinin en içteki boşluklarından sınırına kadar su akışının Darcy yasasına uyduğu kabul edilir. Ancak akış hızı sonlu bir değere sahip olacağından zeminin hacim değişimi zamanla süregelir. Zemin hacminin zamanla değişimi, efektif ve toplam gerilme, boşluk suyu basıncı, geçirimsizlik ve sıkışabilirlik arasındaki karmaşık etkileşim sonucu meydana gelmektedir (Önalp, 2002).

2.2. Zeminin Sıkışabilirliği

Sıkışma bir zemin kütlesinin hacmindeki azalımın sonucudur. Yüzeğe uygulanan yükler zemin kesiti boyunca yatay ve düşey yönlerde gerilme artışları yaratmakta, drenajsız (ani) ve drenajlı konsolidasyon oturması oluşmaktadır. İri daneli zeminlerin sıkışması bağıl olarak kısa sürede tamamlanmaktadır. Geçirimsizliği düşük doymuş ince daneli zeminlerdeki toplam oturma, üç bileşenden oluşmaktadır:

i) Ani oturma tüm diğer malzemelerde de gerçekleşen sıkışma türüdür. Zeminin düşük geçirimsizliğinden dolayı kayda değer hacim değişimi olmaksızın meydana gelen ani oturma doymuş olmayan zeminlerde önemli değerlere ulaşabilmektedir. Temel özelliğine bağılı olan ani oturma elastisite kuramına göre aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir (Uzuner, 1990);

$$S_i = q \cdot B \cdot \frac{1-\nu^2}{E} \cdot I_0 \quad (2.1)$$

Burada;

q: Temel taban basıncı

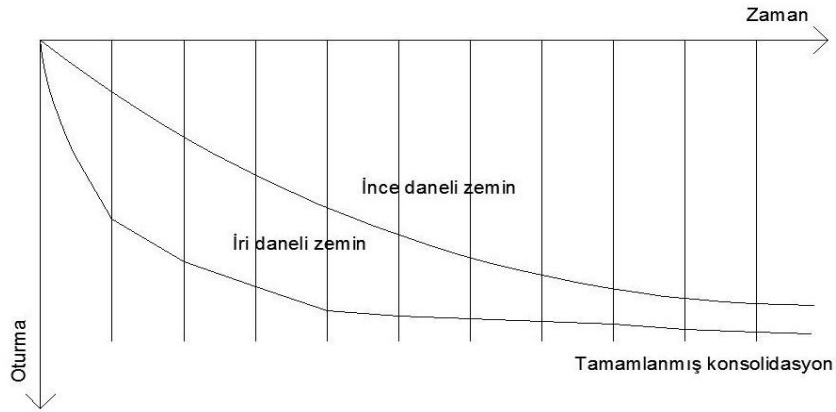
B: Temel genişliği

I_0 : Temel rijitlik katsayısı

E: Zemin elastisite modülü

ν : Poisson oranı

ii) Birincil konsolidasyon oturması doymuş tabakaya gelen gerilme artışı nedeniyle artan boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile ortamdan su çıkışı sonucu oluşan oturmadır. Boşluk suyu basıncının sönmülmesi iri daneli zeminlere oranla çok daha yavaş oluşacağından sıkışma da benzer yavaşlıkla meydana gelecektir.



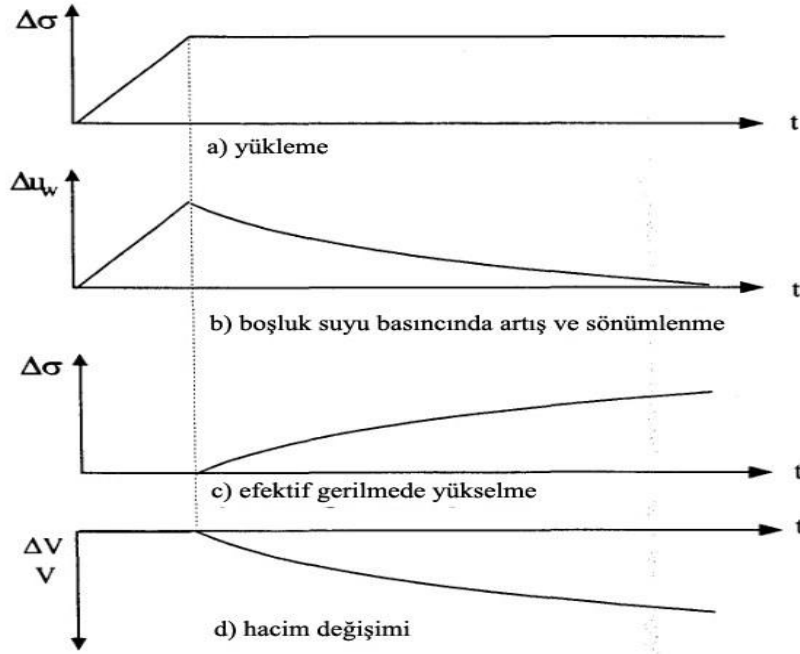
Şekil 2.2. İri ve ince daneli zeminlerde konsolidasyonun zamanla gelişimi (Cernica, 1995)

Diğer bir deyişle, suyun ince daneli bir malzemenin boşluklarından çıkması için uzun süre gerektiğinden doygun bir kil tabakasının sıkışması Şekil 2.2'de gösterildiği gibi uzun bir zaman sonra tamamlanacaktır.

iii) Su içeriği çok yüksek plastik ve organik killerde sünme sonucu beliren ikincil konsolidasyon bu çalışmanın kapsamı dışında kalmaktadır.

2.3. Konsolidasyon Süreci

Terzaghi konsolidasyon kuramı geçirimsizliği görece düşük olan zeminde sıkışmanın sadece yüklenme sonucu dışarıya kaçamadığı için oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının zaman içinde sönümünden kaynaklandığını kabul etmektedir (Terzaghi, 1943; Önalp, 1982). Bir başka deyişle, B parametresi 1.00 olan bir zemin ani gerilme artışı aldığı anda boşluk suyu basıncı da bu gerilme artışına denk büyüklükte artış gösterecektir (Şekil 2.3.a,b) (Önalp, 1982).



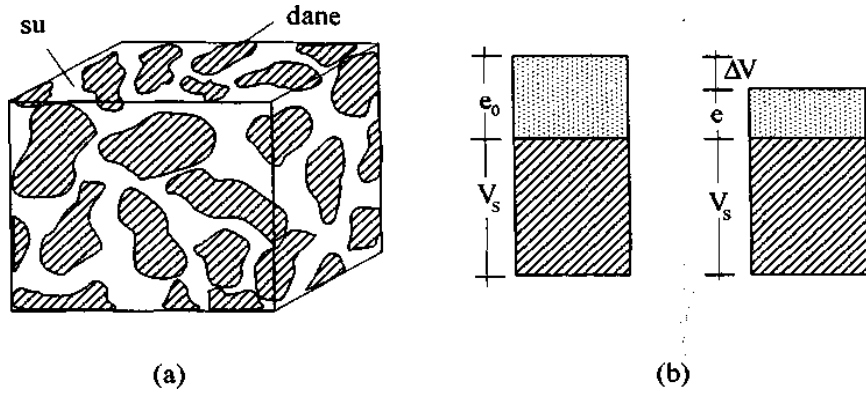
Şekil 2.3. Değişmez gerilme altında konsolidasyonun zamanla gelişimi (Önalp, 1982)

Zeminin geçirirliiliği sıfırdan büyük ise bu fazla boşluk suyu basıncının zaman içinde sönümlenmesi beklenir. O halde, başlangıçta uygulanan gerilmenin ilk aşamada tümü su tarafından taşınırken zaman içinde boşluk suyu basıncının sönmesiyle yük danelere aktarılacağından efektif gerilme denkleminde göre sistemdeki boşluk suyu basıncı sıfıra yönelirken efektif gerilme artışı toplam gerilme artışına eşit olacaktır. Bunun doğal sonucu da Şekil 2.3'de gösterilen hacim azalmasıdır (Önalp, 2002).

2.4. Bir Boyutlu Sıkışma ve Konsolidasyon

Gerilme artışına maruz kalan bir doygun zeminde yatay şekil değiştirmelerin ihmal edilebilir düzeyde kalacağı kabul edildiğinde sıkışma sadece düşey yönde incelenebilir. Hacim bağıntıları Şekil 2.4'de gösterilen blok diyagramına ait zemin örneği için, bir blok diyagramda gösterilen doygun bir zeminde (Şekil 2.4) hacim değişiminin sadece boşluk hacmindeki azalmadan kaynaklanacağı kabul edilmektedir:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{V_s(1+e_0) - V_s(1+e)}{V_s(1+e_0)} = \frac{e_0 - e}{1+e_0} \quad (2.2)$$



Şekil 2.4 a. Doygun bir zemin elemanı b. Doygun zeminde tek boyutlu sıkışma

Hacimdeki azalma oranı tek boyutlu durumda sadece boydaki azalma oranına eşit olduğu kabul edilirse bir boyutlu sıkışma denklemi;

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{V_s(1+e_0) - V_s(1+e)}{V_s(1+e_0)} = \frac{e_0 - e}{1+e_0} \quad (2.3)$$

olarak yazılabilir.

Doygun zeminlerin genel bir konsolidasyon kuramı gerilme ve şekil değiştirme durumlarını üç boyutlu olarak göz önüne almayı gerektirir. Terzaghi'nin geliştirdiği bir boyutlu konsolidasyon kuramında aşağıda sıralanan kabuller yapılmakta ve çözüme önemli kolaylık getirilmektedir;

- Zemin homojen (türdeş)dir.
- Tüm boşluklar sıkışmaz suyla doludur.
- Danelerin sıkışabilirliği suyunkine oranla ihmal edilebilir.
- Suyun sıkışabilirliği zemin iskeletine göre ihmal edilebilir.
- Darcy yasası geçerlidir.
- Sıkışmalar ve suyun zeminde hareketi tek yönde oluşur.
- Sıkışabilirlik ve geçirimsizlik zeminin aldığı gerilme kademesinden bağımsızdır.
- Boşluk oranı efektif gerilmenin fonksiyonu olup zamanla değişmez.
- Oluşan sıkışmalar kilin ilk kalınlığına oranla küçük olduğundan ortalama

özellikler ve ortalama boyutlar kullanılabilir.

- Gerilme artışları ani olarak uygulanmaktadır.
- Zemin iskeleti hacim değişimine akışmaz direnç göstermez.

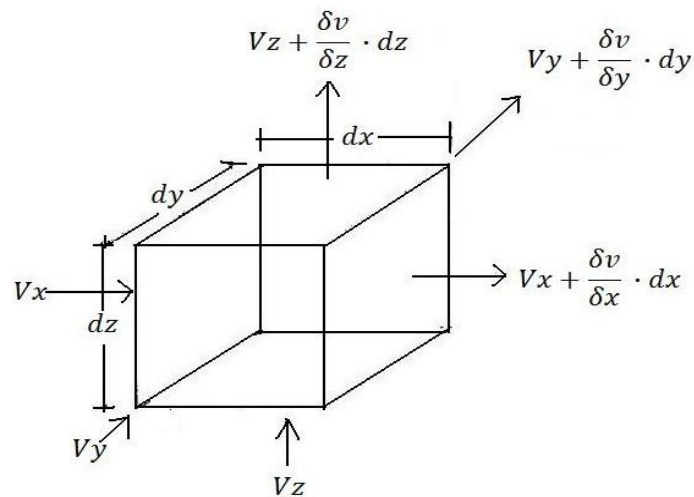
Terzaghi (1943)'ye göre doymun bir küp zemin elemanına giren ve çıkan su miktarı arasındaki farkın sıkışma miktarına eşitlenmesiyle bir boyutlu konsolidasyon denkleminin çözümü sağlanmaktadır. Şekil 2.5'deki birim küpe giren ve çıkan su debileri;

$$q_{giren} = \left(v_x - \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2} \right) \cdot dy \cdot dz + \left(v_y - \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot \frac{dy}{2} \right) \cdot dx \cdot dz + \left(v_z - \frac{\partial v_z}{\partial z} \cdot \frac{dz}{2} \right) \cdot dx \cdot dy \quad (2.4)$$

$$q_{çikan} = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2} \right) \cdot dy \cdot dz + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot \frac{dy}{2} \right) \cdot dx \cdot dz + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \cdot \frac{dz}{2} \right) \cdot dx \cdot dy \quad (2.5)$$

ifadelerinden oluşmaktadır. Giren ve çıkan debiler arasındaki fark zeminin o süre sonundaki sıkışmasını göstermektedir:

$$\Delta_q = \frac{\partial V}{\partial t} = \left[\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] \quad (2.6)$$



Şekil 2.5. Zemin elemanında akım

Bu ifadeler yukarıda kabuller çerçevesinde çözüldüğünde çeşitli sınır koşullarında çözümü yapılabilen diferansiyel denklem, 2.7'deki bir boyutlu konsolidasyon denklemi elde edilir:

$$c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (2.7)$$

burada c_v , konsolidasyon katsayısını (cm^2/s) göstermektedir.

Denklemin çözümünde tanımlanan konsolidasyon katsayısı;

$$c_v = \frac{k}{\rho_w} \cdot \left(\frac{1+e}{a_v} \right) \quad (2.8)$$

biçiminde tanımlanmıştır. Burada;

k: Geçirimsizlik katsayısı (cm^2/s)

a_v : Sıkışma katsayısını göstermektedir.

Konsolidasyon katsayısının boyutsuz zaman faktörüyle bulunması denklem 2.9'daki gibidir.

$$c_v = \frac{T_v H^2}{t} \quad (2.9)$$

Burada , T_v : Zaman faktörü (boyutsuz)

H: Drenaj mesafesini temsil etmektedir.

Örneğin başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı üniform ortamda zaman faktörü konsolidasyon yüzdesi ($U_s = \Delta H / S_\infty$) veya ona eşit olan boşluk suyu basıncı sönümlenme derecesinden (U_p) bulunabilir.

$$U_s = U_p = \frac{\int_0^H \left(1 - \frac{u(t) \cdot dz}{u_0} \right)}{\int_0^H u_0 \cdot dz} = 1 - \sum \frac{2}{M^2} \cdot \exp(-M^2 T_v) \quad (2.10)$$

2.5. Sıkışma Katsayısı ve Sıkışma İndisi

Konsolidasyon eğrisi zeminin sıkışma davranışını yansıtmaktadır. Zeminin sıkışabilirliği boşluk oranındaki azalmayı belirten denklem 2.11'deki sıkışma katsayısı a_v ile ifade edilir. Sıkışma katsayısı boşluk oranı-efektif gerilme eğrisinin eğimidir. Eğrinin eğimi sabit olmadığından sıkışma katsayısının değeri de değişkendir.

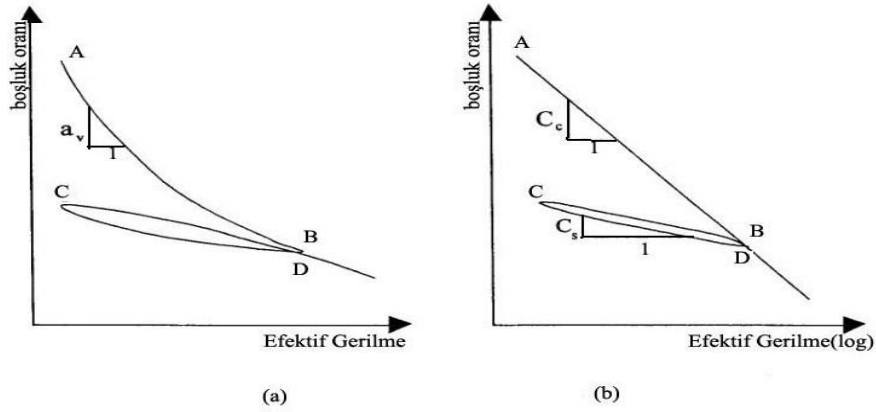
$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta \sigma} \quad (2.11)$$

Denklem 2.2'deki son sıkışma miktarı da böylece

$$S_\infty = \Delta H = H_0 \cdot \frac{a_v}{1 + e_0} \cdot \Delta \sigma \quad (2.12)$$

halini alır. Ortadaki terim blok diyagramda hacim ifade ettiğinden hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) adını almaktadır.

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (2.13)$$



AB: Bakır sıkışma eğrisi BC: Boşaltma/şişme eğrisi CD: Yeniden yükleme eğrisi

Şekil 2.6. Sıkışabilir bir zemin için ideal boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi

Şekil 2.6.b'de görüldüğü gibi sıkışma eğrisi yarı logaritmik eksen takımında çizildiğinde hemen tüm zeminlerde bir doğruya dönüşmektedir. Bu durumda doğrunun hesaplanan eğimi sıkışma indisi adını almaktadır.

$$C_c = -\frac{de}{d(\log \sigma')} \quad (2.14)$$

Sıkışma katsayısı ile sıkışma indisi arasında aşağıdaki bağıntı bulunmaktadır.

$$a_v = \frac{0.435C_c}{\sigma'} \quad (2.15)$$

Sıkışma indisi kullanıldığında son sıkışma denklemi 2.12' de

$$S_\infty = \Delta H = H_0 \cdot \frac{C_c}{1+e_0} \cdot \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \quad (2.16)$$

biçimine dönüşmektedir (Terzaghi ve Peck, 1967).

2.6. Radyal Konsolidasyon Teorisi

Radyal konsolidasyon kavramı aksenal akışın sıfır olduğu kısa süreli radyal akışın olduğu durumda aksisimetrik problemler için kullanılmaktadır. Bu durumda konsolidasyon denklemi

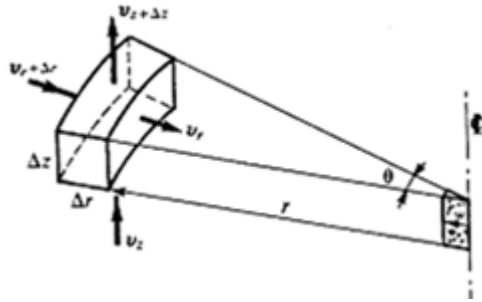
$$c_v \left(\frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_e}{\partial r} \right) = \frac{\partial u_e}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \quad (2.17)$$

şekline dönüşmektedir (Scott, 1963).

Rendulic (1936) radyal akış durumunda tek boyutlu düşey sıkışma için diferansiyel denklem çözümünü

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (2.18)$$

olarak sunmuştur Şekil 2.5.



Şekil 2.7. Radyal drenaj durumu

Carillo (1942) ise radyal drenaj ile birleştirilmiş tek boyutlu konsolidasyon için fazla boşluk suyu basıncı değerini ($u_{r,z}$);

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad [u_{r,z} = u_r u_z / u_0] \quad (2.19)$$

şeklinde vermiştir. Burada u_0 başlangıç boşluk suyu basıncını göstermektedir. Ortalama konsolidasyon derecesi ise;

$$(1-\bar{U}) = (1-\bar{U}_z)(1-\bar{U}_r) \quad (2.20)$$

İle hesaplanmaktadır. Burada \bar{U} düşey ve radyal drenaj için herhangi bir t zamanındaki ortalama konsolidasyon derecesini, \bar{U}_z ve \bar{U}_r ise sırasıyla düşey ve radyal akış için ortalama konsolidasyon derecelerini göstermektedir.

BÖLÜM 3. SİTLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI

Kumlara özgü olduğu düşünülen sıvılaşma olayının depremlerde elde edilen gözlem sonuçları ve araştırmalar neticesinde silt boyutundaki ince daneli zeminlerde de oluşabileceği görülmüştür. 1980'li yıllarda siltlerin de kumlar gibi sıvılaşma göstereceği varsayılır olmuştur. Özellikle Çin depremlerinden elde edilen deneyimler önce Çin Kriteri olarak tanıtilen özelliklerle literatüre yansımıştır (Wang, 1979). Çin kriteri siltin sıvılaşmasını doğal su muhtevası, likit limit, kil yüzdesi ($< 5 \mu\text{m}$) gibi fiziksel özelliklere bağlamıştır. Sakarya Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiş araştırmalar siltlerin sıvılaşma yeteneğinin zeminin fiziksel özellikleri ile kolayca saptanabileceği bulgularını getirmiş ve bu amaca yönelik olarak Adapazarı Kriteri'nin revize edilmiş biçimi önerilmiştir (Bol vd., 2010).

Siltlerde sıvılaşmanın, kumlarda görülen kolaylıkla oluşmadığı, hatta MI ve MH siltlerde olağan deprem koşullarında ($M_w < 7$, $t < 50$ s) belki de hiç belirmediği yolunda kuşku vardır. Buna bağlı olarak da siltlerin kumsu ve kilsli olarak ayırtlanması ve sıvılaşabilir grubun daha ziyade kumsular olduğu öne sürülmüştür (Idriss ve Boulanger, 2006). Daha açık bir ifade ile, kilsli siltte ve killi zeminlerde sadece çevrimsel yumuşama olası iken kumsu karışımlarda tipik sıvılaşma belirtileri ortaya çıkmaktadır. Kesin yargıya varılamayan birçok durumda da dinamik deneyler yapılması hemen tüm araştırmacılarca önerilmektedir.

Adapazarı Kriterleri olarak sunulan (Önalp ve Arel, 2002) ve siltli zeminlerin 1999 depreminde performansını yansıtan bilgiler literatürde Çin kriteri olarak anılan bilgilerin kritik değerlendirilmesi ile üretilmiştir. Bu bilgiler sürekli yeni deneyler ve incelemelerle güncellenmektedir. Bu kriterler büyük arazide sıvılaşmış/sıvılaşmamış sitelerde yapılan gözlemler ve buralardan alınan numunelerin deneye tabi tutulması

ile geliştirildiğinden, güvenilirliği yüksek olarak nitelendirilebilir. Son biçimi ile Adapazarı Kriteri'ne göre bir ince daneli zeminin sınıflaştırılması için

$$I_L \geq 0.9 \text{ (} w_p \text{ ölçülemiyor ise } w_n/w_L \text{ oranı)}$$

$$w_L \leq 33$$

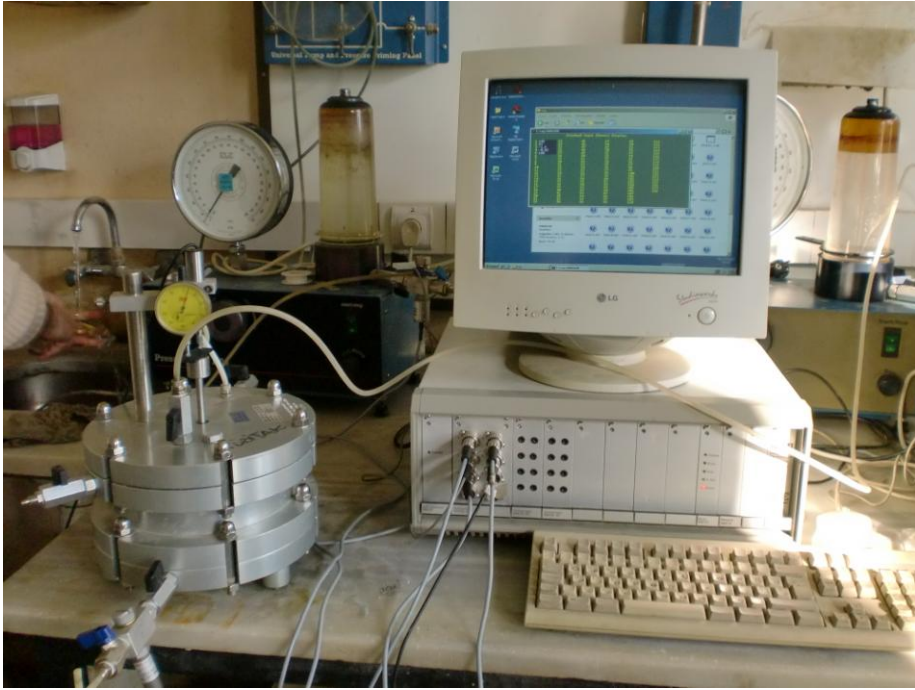
$$C \leq \% 10$$

$$D_{50} > 0.02 \text{ mm}$$

koşullarının tümünün sağlanması gerekmektedir. Bu kriterde $25 < w_L < 33$ ve $10 < \% C < 15$ aralıklarında numunelerin dinamik deneylerle değerlendirilmesi önerilmiştir (Bol vd., 2010). Adapazarı kriterlerinde plastisite indisinin yer almamasının nedeni olarak düşük plastisiteli ile sınıflaştırılabilir NP zeminlerde plastik limitin ölçümdeki tutarsızlıklar gösterilebilir. Bölgenin üst sınırı ise $I_p = 12$ ile gösterilmiş olup, Bray ve Sancio (2006) önerisi ile uyum içindedir. Ancak, bu plastisite indisi değerinin deneyle ölçülebilir en alt sınırı göstermesi nedeniyle, belki de sadece NP siltlerin sınıflaştırılabileceği gerçeği tartışılır olmaktadır. Öneriler genel olarak değerlendirildiğinde, sınıflaştırılabilir siltli zeminlerin “kumsu” karakterde olduğu hakkında görüş birliği olduğu, kumsudan kilsiye geçişte mekanik deneylerden de yararlanılarak yargıya varılmasının uygun olacağı ve sonuçta kilsi zeminlerin sınıflaştırılmayacağı gibi bir görüş belirlemektedir.

BÖLÜM 4. RADYAL KONSOLİDASYON

Ödometrede konsolidasyon ölçümünün getirdiği bazı eksiklikleri bertaraf etme amacıyla 1960'lı yıllarda geliştirilen hidrolik hücre (Rowe, 1966), zeminlerin sıkışabilirliğinin daha iyi koşulların kontrol edilebildiği bir deneyde ölçülmesi fikrinden ortaya çıkmıştır. Şekil 3.1'de hidrolik konsolidasyon hücresi olarak da bilinen Rowe hücresi düzeni gösterilmektedir. Hidrolik hücre içinde konsolidasyon basıncı numuneye içi su dolu bir lastik körük vasıtasıyla uygulanmaktadır.



Şekil 4.1 Hidrolik konsolidasyon hücresi deney sistemi

Hücre içinde numuneye düşey ve/veya radyal drenaj uygulanabilmekte, geri basınç ve drenaj genelde hücre kenarından sağlanmaktadır. Numune çapı 150 mm olabilmekte, yükseklik ise 50 ± 5 mm ye çıkabilmektedir. Deneyde basınç artışı uygulanırken drenaj vanaları kapalı tutulmakta, boşluk suyu basıncının maksimum

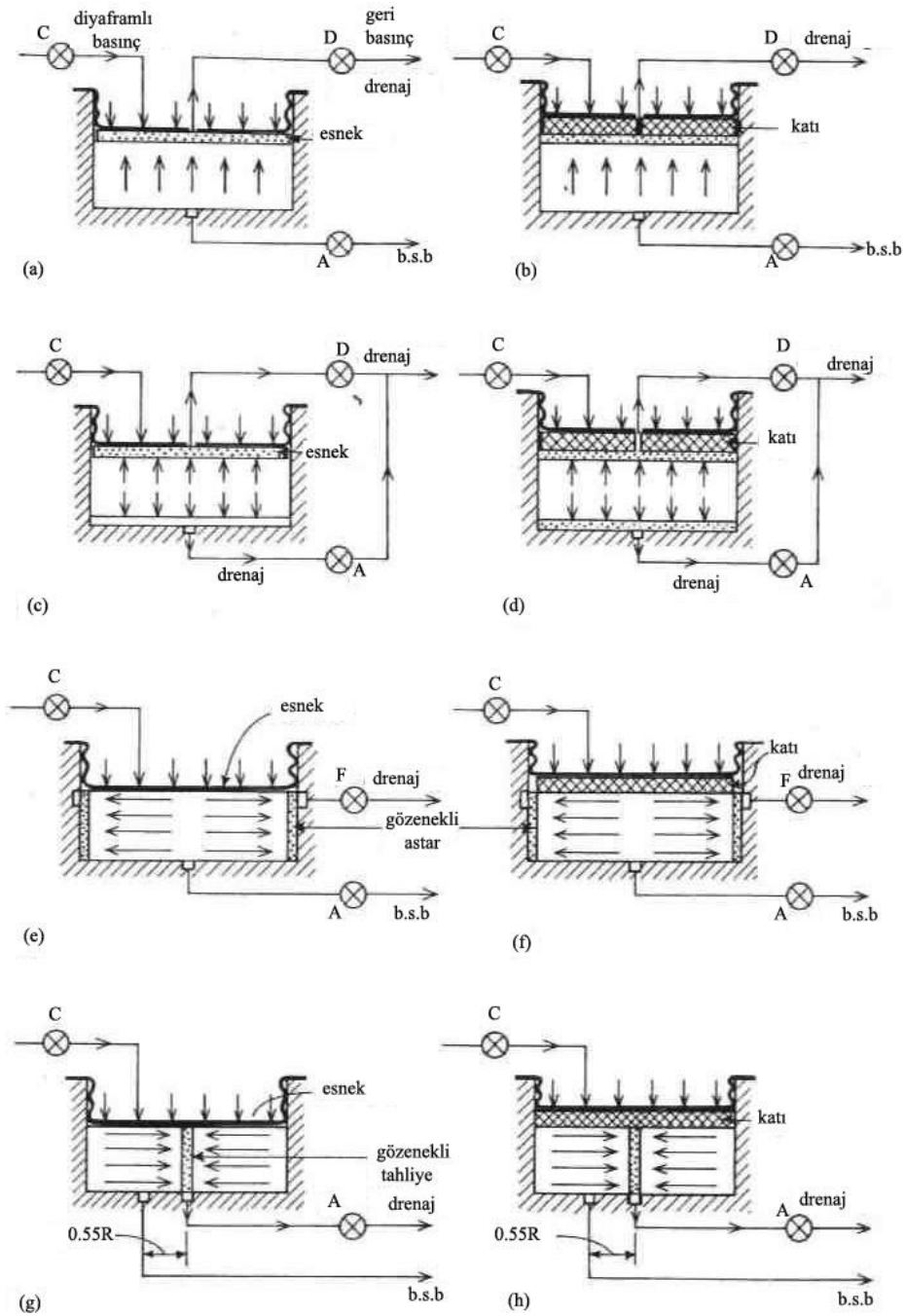
değere ulaştığı görüldükten sonra vanalar açılmakta ve boşluk suyu basıncının sönümlenmesi, sıkışma ve hacim değişimi ile birlikte sürekli olarak izlenmektedir.

Radyal konsolidasyon deneyinde Şekil 4.2’de gösterildiği gibi drenajın içeriye veya dışarıya doğru yapılması mümkün olup, düşey drenaj tek yönlü, çift yönlü veya radyal olarak sağlanabilmektedir.

Zeminin yatay geçirimsizlik katsayısını ölçmek için numune hem çevre (plastik dren) hem de merkez dreni (kum) ile hazırlanabilir ve her gerilme artışı sonunda merkezden dışa ya da dıştan merkeze doğru akım sağlanarak yanal hidrolik iletkenlik katsayısı

$$k_h = \frac{Q \cdot \ln(r_e / r_w)}{2\pi \cdot \Delta D \cdot \Delta h} \quad (4.1)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada Q sağlanan akımda denge debisi, r_w merkezdeki drenin yarıçapı, r_e eksenden dış drene olan uzaklık, Δh numuneye uygulanan hidrolik yük, ΔD ise numune kalınlığıdır. Yükleme durumu körük altına esnek veya rijit başlık konmasıyla serbest şekil değiştirme veya eşit şekil değiştirme koşullarını yansıtabilmektedir. Şekil 4.2’de bu durumlar ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Hidrolik hücre drenaj ve yükleme durumları (Head, K.H.,1985)

Düşey veya yanal konsolidasyon katsayısı (c_h) %50 ve %90 konsolidasyon için Tablo 4.1'de verilen ölçek katsayılarının kullanımı ile ilgili formülden yararlanılarak hesaplanabilmektedir.

Tablo 4.1. Hidrolik hücre konsolidasyon deneylerinde ölçek katsayıları

Test	Drenaj	Sınır ş.d.	Kons. konumu	Teorik Zaman Faktörü			Zaman fonk.	Eğri eğimi	Kull. ölç.	Kons katsy/yıl
				t ₅₀		t ₉₀				
(a) ve (b)	Düşey, tek yön	Serbest ve eşit	Ortalama Merkezi	0.197 0.379	T _v	0.848 1.031	t ^{0,5}	1.15 ΔV/ΔH** b.s.b.	c _v = 0.526 $\frac{T_v H^2}{t}$	
(c) ve (d)	Düşey, çift yön	Serbest ve eşit	Ortalama	0.197	T _v	0.848	t ^{0,5}	1.15 ΔV/ ΔH	c _v = 0.131 $\frac{T_v H^2}{t}$	
(e)	Radyal, dışa	Serbest	Ortalama Merkezi	0.0632 0.200	T _{r0}	0.335 0.479	t ^{0,465}	1.22 ΔV b.s.b.	c _h = 0.131 $\frac{T_{r0} D^2}{t}$	
(f)		Eşit	Ortalama Merkezi	0.0866 0.173	T _{r0}	0.288 0.374	t ^{0,5}	1.17 ΔV/ΔH b.s.b.	c _h = 0.131 $\frac{T_{r0} D^2}{t}$	
(g)	Radyal, içe*	Serbest	Ortalama r=0.55R	0.771 0.765	T _{ri}	2.631 2.625	t ^{0,5}	1.17 ΔV b.s.b.	c _h = 0.131 $\frac{T_{ri} D^2}{t}$	
(h)		Eşit	Ortalama r=0.55R	0.781 0.778	T _{ri}	2.595 2.592	t ^{0,5}	1.17 ΔV/ ΔH b.s.b.	c _h = 0.131 $\frac{T_{ri} D^2}{t}$	

*: Drenaj oranı; **: ΔH sadece eşit şekil değiştirme için; T_v, T_{r0}, T_{ri}: teorik zaman faktörleri;

t: zaman (dakika); H: numune boyu; D: numune çapı (mm)

4.1. Hidrolik Hücrede Sönümlenme

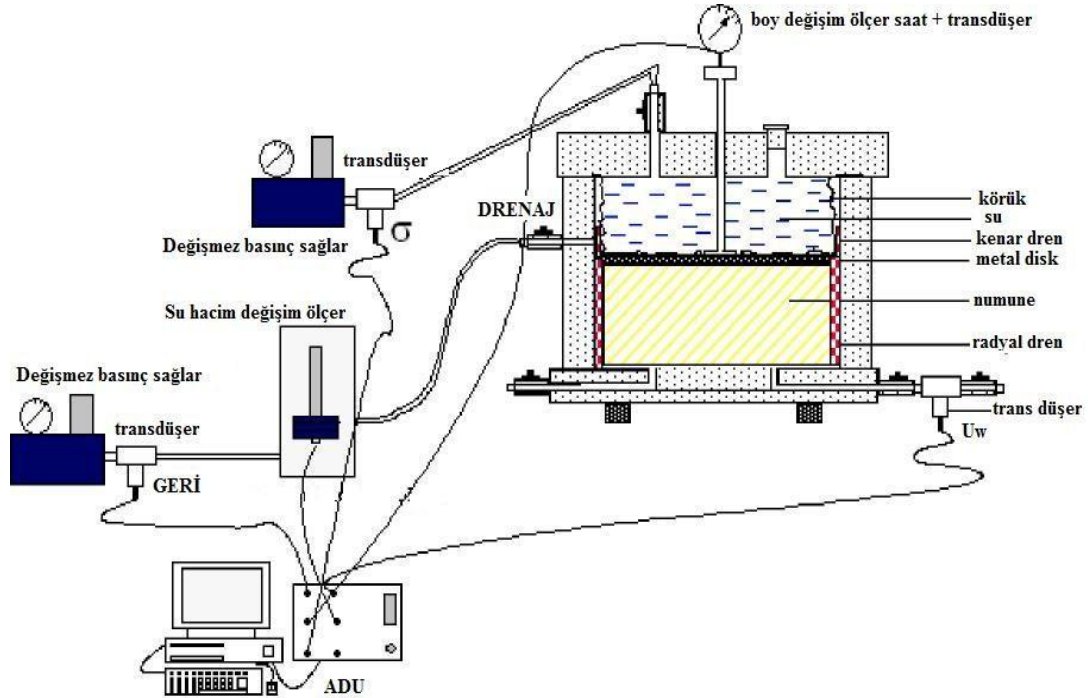
Yürütülen laboratuvar sönümlenme deneyleri Şekil 4.1'de gösterilen 150 mm çaplı hidrolik konsolidasyon hücresi deney setinde gerçekleştirilmiştir. Deney sisteminin bir görünümü de Foto 4.1'de verilmiştir. Bu şekillerden de görüleceği gibi drenaj radyal dren vasıtasıyla sağlanmakta, hücre kenarından verilen drenaj çıkışı hacim değişim ölçer ve geri basıncın verildiği değişmez basınç sağlar pompaya bağlanmaktadır.

Düşey gerilme, numune üzerine etkiyen su dolu körük vasıtasıyla bir başka değişmez basınç sağlar tarafından sağlanmakta, numune üzerine yerleştirilen rijit metal disk ile eşit şekil değiştirme koşulu oluşturulmaktadır. Numune boy değişimi üst taraftaki 0.002 mm hassasiyetli boy değişim ölçer saat ve transdüşer ile ayrı ayrı ölçülmektedir. Değişmez basınç sağlamların çıkış basınçları ile numune tabanından

boşluk suyu basıncı basınç trans duserleri ile ölçülmektedir. Elektronik olarak alınan tüm veriler ADU veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayarda toplanmaktadır.

4.1.1. Deney prosedürü

Laboratuvar sönümlenme deneyleri yukarıda tariflenen 150 mm'lik hidrolik hücre kullanımıyla gerçekleştirilmiştir. Bulamaç halinde hazırlanan karışım numuneleri hücre içine 5.0 ± 0.5 mm yüksekliğinde yerleştirilmektedir. Hücre kapatıldıktan sonra kademeli olarak düşey gerilme-geri basınç uygulamasına geçilmekte ve hücre basıncı ile geri basınç arasında 10 kPa fark olacak şekilde 50 kPa'lık adımlarla 500 kPa geri basınca ulaşılmaktadır.



Şekil 4.3. Rowe hücresi sönümlenme deneylerinde kullanılan deney düzeneği (Özocak vd., 2008)



Foto 4.1. Rowe laboratuvar sönümlenme deneyleri düzeneğinden bir görünüş

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Numune Hazırlama

Siltli zeminlerin yanal konsolidasyon özelliklerini ölçmek amacıyla bu çalışma kapsamında öncelikle Adapazarı kent merkezi Yenigün mahallesi Tacettin Sert arsasından getirilmiş olan doğal numune laboratuvarda bir takım işlemlerden geçirilerek sadece silt boyutundaki malzemenin ayrılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda sırasıyla;

- Numune el arabasına yüklenerek laboratuvar içerisine taşınmış (Foto 5.1) ve belli miktarlarda numune 40 nolu elekten elenerek çökeltme havuzuna alınmıştır (Foto 5.2).



Foto 5.1. Numunenin el arabasıyla laboratuvara taşınması



Foto 5.2. Numunenin çökeltme havuzuna alınması

- Elenen numune su ile iyice karıştırıldıktan sonra kronometre çalıştırılmıştır.



Foto 5.3. Numunenin 40 nolu elekten elenmesi ve iyice karıştırılması

- Karışım 5 dakika bekletilerek silt ve kum havuza çöktürüldükten sonra santrifüj çalıştırılarak çözelti içinde asılı olarak kalan kil numunesi büyük havuza pompalanmıştır.
- Küçük havuza tekrar su doldurularak ve numune tekrar iyice karıştırılarak ve her seferinde 5 dakika çökmesine izin verilerek bu işlem toplam 6 kez tekrarlanmış, çökeltme havuzunda sadece silt ve kum boyutundaki malzemelerin kalması sağlanmaya çalışılmıştır.

- Yaklaşık 500 kg numune bu şekilde ayrıştırılmıştır.



Foto 5.4. Su ile birlikte karıştırılan numunenin 5 dk çöktürülmesi



Fotoğraf 5.5. Santrifüjle kilin büyük havuza pompalanması

- Kili ayrıştırılmış numune tekrar kovalara doldurularak 200 nolu elekten yıkama yöntemiyle siltin eleğin altına geçmesi sağlanmış ve elek üstünde toplanan kum numuneleri alınarak silt daneleri kum danelerinden ayrıştırılmıştır (Foto 5.6).

- Bu işlem kili ayrıştırılmış tüm numuneler için yapılmış ve saf silt elde edilmiştir.



Foto 5.6. Silt-kum karışımından siltin yıkama eleme yöntemiyle elde edilmesi

- Toplanan silt önce $40C^0$ 'ye ayarlanmış olan etüvde sonra oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır.
- Kurutulan silt toz haline ufalandıktan sonra 200 nolu elekten elenerek kovalara doldurulup muhafaza edilmiştir.
- Elde edilen siltten 3000'er gram alındıktan sonra havuzda çökelen kilden ağırlıkça %1.5, %3, %6, %7.5, %9, %12, %15, %20, %30, %44, %58, %72 ve %86 oranında kil katılarak homojen şekilde karıştırılmıştır.
- Bunun yanında %100 silt, %100 kil ve Yenigün siltinden 3000'er gr numune saf olarak hazırlanmıştır.



Foto 5.7. Etüvden alınan siltin masa üzerine serilip kurutulması



Fotoğraf 5.8. Kurutulan siltin harman yapılması

- Hazırlanan bu numunelere 1350 cc su ilave edilerek iyice karıştırılmış ve 24 saat dinlendirilmiştir.
- Dinlendirilen numuneler her biri ayrı ayrı 1-2 saat desikatörde vakuma maruz bırakılmışlardır.



Fotoğraf 5.9. Su ilave edilen numunenin karıştırılması



Fotoğraf 5.10. Numuneye vakum uygulama

5.2. Fiziksel Deneyler

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan şekilde hazırlanan tüm numunelerin fiziksel deneyleri TS 1900-1/2006'ya göre yapılmıştır. Araştırmanın bünyesinde çarpmalı yöntem (Casagrande) (Foto 5.11) ve koni düşürme yöntemi (Foto 5.12) ile likit limit deneyleri, plastik limit deneyi, özgül ağırlık deneyi (Foto 5.13), dane çapı dağılımının bulunması için pipet ve hidrometre deneyleri (Foto 5.14) yapılmıştır. Karışım numunelerinin fiziksel deney sonuçları özet olarak Tablo 5.1'de görülmekte olup, dane dağılımı eğrileri EK-I'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Karışım numuneleri fiziksel özellikleri

Numune Adı	Çarpmalı w _L	Koni w _L	Plastik Limit	I _p	% Kil	D ₅₀		G _s	Simges (TS1500)
						Hidrometre	Pipet		
K020	NP	38	NP	NP	2	0.037	0.037	2.72	ML
K024	NP	38	NP	NP	2.4	0.040	0.035	2.71	ML
K032	NP	36	NP	NP	3.2	0.039	0.038	2.72	ML
K040	NP	36	NP	NP	4	0.039	0.036	2.7	ML
K043	NP	35	NP	NP	4.3	0.037	0.035	2.7	ML
K048	NP	34	NP	NP	4.8	0.030	0.036	2.7	ML
K050	NP	35	NP	NP	5	0.031	0.035	2.7	ML
K056	NP	34	NP	NP	5.6	0.028	0.034	2.69	ML
K072	30	33	26	NP	7.2	0.030	0.034	2.7	ML
K080	32	36	23	9	8	0.025	0.027	2.73	ML
K096	33	37	24	9	9.6	0.024	0.024	2.72	ML
K112	34	37	22	12	11.2	0.021	0.030	2.72	ML
K144	35	37	22	13	14.4	0.016	0.020	2.72	MI
K184	55	52	27	28	18.4	0.007	0.007	2.71	CH
Tsert	NP	37	NP	NP	1.6	0.034	0.040	2.72	ML
Yenikent	NP	32	NP	NP	3.2	0.046	0.035	2.7	ML



Fotoğraf 5.11. arpmalı alette (Casagrande) likit limit deneyi



Fotoğraf 5.12. Koni düşürme deneyi



Fotoğraf 5.13. Özgöl ağırlık deney numuneleri



Fotoğraf 5.14. Hidrometre deney numuneleri

5.3. Hidrolik Hücrede Sönümlenme Deneyleri

Laboratuvar sönümlenme deneyleri yukarıda tariflenen 150 mm'lik hidrolik hücre kullanımıyla gerçekleştirilmiştir. Likit limitin 1.5 katı su muhtevasında bulamaç halinde hazırlanan karışım numuneleri 5.0 ± 0.5 mm yüksekliğinde numune hücre içine yerleştirilmiştir (Foto 5.15). Hücre kapatıldıktan sonra konsolidasyon-geri basınç işlemine geçilmiş ve hücre basıncı ile geri basınç arasında 10 kPa fark olacak şekilde 50 kPa'lık adımlarla 500 kPa geri basınca ulaşılmıştır. Doyurma aşamasında ölçülen B parametresinin 0.95' in üzerinde bir değere yükseldiğinin teyidinden sonra yükleme aşamasına geçilmektedir. Karışım numunelerinin konsolidasyonu bulamaç halinden başladığından B parametresi konsolidasyon aşamasında 1 veya 1'e çok yakın değerler almıştır. Ancak ön çalışmalarda düşük geri basınç kullanımında, ilerleyen yüklemelerde B'nin hızla düşmesi nedeniyle tüm numunelerde geri basıncın 500 kPa olarak alınması uygun görülmüştür. Net gerilme 25, 50, 100 ve 200 kPa'lık artışlarla numuneler 400 kPa'a (900-500) dek yüklenmişlerdir. Yükleme körüğünün kapasitesi (1000 kPa) nedeniyle daha yüksek gerilmelere çıkmak mümkün olmamaktadır. Her gerilme artışının uygulanmasından sonra boşluk suyu basıncının ($u_w = b.s.b.$) sabitlenmesinin ardından geri basınç vanası açılarak radyal drenaj yoluyla sönümlenme aşamasına geçilmiş ve boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi izlenmiştir. Her kademe b.s.b. sönümlenme okumaları 24 saat boyunca sürdürülmüş, bunlar başta sık, gittikçe seyrelen aralıklarla kaydedilmiştir.



Fotoğraf 5.15. Rowe hücresine numune yerleştirme ve deney düzeneği

Deney sonunda hücre açıldığında numunenin boyu kumpas yardımıyla ölçülerek deney esnasında dijital transdüşer ve analog mikrometre ile alınan okumaların teyidi yapılmıştır (Foto 5.16). Bunun yanında deney sonu ağırlığı alınan numuneler etüvde kurutularak kuru numune ağırlıkları ölçülmüştür.



Fotoğraf 5.16. Rowe hücresi deney sonu numune boyu ölçme



Fotoğraf 5.17. Deney sonu numune tartımı ve etüve konulması

5.4 Deney Sonuçlarının Adapazarı Kriteri Açısından İncelenmesi

Sakarya Üniversitesi'nce gerçekleştirilmiş araştırmalar siltlerin sıvılaşma yeteneğinin zeminin fiziksel özellikleri ile kolayca saptanabileceği bulgularını getirmiş ve bu amaca yönelik olarak Adapazarı Kriteri'nin revize edilmiş biçimi önerilmiştir (Bol vd., 2010). Bölüm 4'te anlatılan Adapazarı Kriterine göre bu çalışmada kullanılan karışım numunelerinin sıvılaşp sıvılaşmayacağına bakılmış ve Tablo 5.2'de bu sonuçlar gösterilmiştir.

Adapazarı Kriterleri literatürde Çin kriteri olarak anılan bilgilerin kritik değerlendirilmesi ile üretilmiştir. Bu bilgiler sürekli yeni deneyler ve incelemelerle güncellenmektedir. Bu kriterler sıvılaşmış-sıvılaşmamış büyük arazilerde yapılan gözlemler ve buralardan alınan numunelerin deneye tabi tutulması ile geliştirildiğinden, güvenilirliği makul derecede yüksek olarak nitelendirilebilir.

Tabloya bakıldığında numunelerin çoğunda bu kriter gere göre sıvılaşma oluşması beklenmektedir. Adapazarı kriterinde yer alan $I_L \geq 0.9$ şartı numuneler doğal numune olmamasından dolayı bu koşul sağlanıyor olarak düşünülmüştür.

Tablo 5.2. Adapazarı Kriteri açısından numunelerin incelenmesi

Numune Adı	Çarpmalı W _L	Koni W _L	Plastik Limit	IP	% Kil	D ₅₀		Simge	Sıvılaştırma*
						Hidrometre	Pipet		
K020	NP	38	NP	NP	2	0.037	0.037	ML	Var
K024	NP	38	NP	NP	2.4	0.040	0.035	ML	Var
K032	NP	36	NP	NP	3.2	0.039	0.038	ML	Var
K040	NP	36	NP	NP	4	0.039	0.036	ML	Var
K043	NP	35	NP	NP	4.3	0.037	0.035	ML	Var
K048	NP	34	NP	NP	4.8	0.030	0.036	ML	Var
K050	NP	35	NP	NP	5	0.031	0.035	ML	Var
K056	NP	34	NP	NP	5.6	0.028	0.034	ML	Var
K072	30	33	26	NP	7.2	0.030	0.034	ML	Var
K080	32	36	23	9	8	0.025	0.027	ML	Var
K096	33	37	24	9	9.6	0.024	0.024	ML	Var
K112	34	37	22	12	11.2	0.021	0.030	ML	Yok
K144	35	37	22	13	14.4	0.016	0.020	MI	Yok
K184	55	52	27	28	18.4	0.007	0.007	CH	Yok
Tsert	NP	37	NP	NP	1.6	0.034	0.040	ML	Var
Yenikent	NP	32	NP	NP	3.2	0.046	0.035	ML	Var

* Adapazarı Kriterine göre (Bol vd., 2010)

5.5. Sönümlenme Deney Sonuçları

Hidrolik hücrede yapılan laboratuvar sönümlenme deneylerinde drenaj koşulları, içten dışa doğru radyal drenaj biçiminde uygulanmıştır. Yükleme ve drenaj vanasının açımını takiben 6 sn ile başlayan boşluk suyu basıncı okumaları iki kat artan aralıklar en az 24 saat ya da 500 kPa geri basınç değerine ulaşana dek sürdürülmüştür. Literatüre bakıldığında, hidrolik hücrede içten dışa doğru drenaj koşullarında ölçülen t_{50} ve t_{90} değerleri kullanılarak radyal konsolidasyon katsayısının (Head, 1986);

$$c_{ro} = 0.131 \frac{T_{ro} D^2}{t} \quad (5.1)$$

ifadesi ile bulunduğu görülmektedir. Burada D: numune çapını (mm), t: zamanı (dk), T_{r0} : teorik zaman faktörünü göstermektedir. Eşit oturma ve serbest oturma durumları için kullanılacak zaman faktörleri de Tablo 5.3’de verilmektedir.

Tablo 5.3. Radyal konsolidasyon zaman faktörleri

Drenaj yönü	Oturma	Konsolidasyon konumu	Zaman faktörü	
			T_{50}	T_{90}
Radyal Dışa doğru	Serbest	Ortalama	0.0632	0.335
		Merkezi	0.200	0.479
Radyal Dışa doğru	Eşit	Ortalama	0.0866	0.288
		Merkezi	0.173	0.374

Sürekli okuma alınan laboratuvar Rowe sönümlenme deneyi grafik sonuçları Ek-II’de verilmekte olup deneylerden belirlenen t_{50} ve t_{90} değerleri ile yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanan radyal konsolidasyon katsayıları Tablo 5.4.’te listelenmiştir. Tabloda görülen t_{50} ve t_{90} değerlerine ulaşmak için sönümlenme eğrileri U_r -t eksenlerinde çizilip buradan konsolidasyon yüzdesi U_{50} , U_{90} ve U_{100} için t_{50} , t_{90} ve t_{100} değerleri okunmuştur. Burada

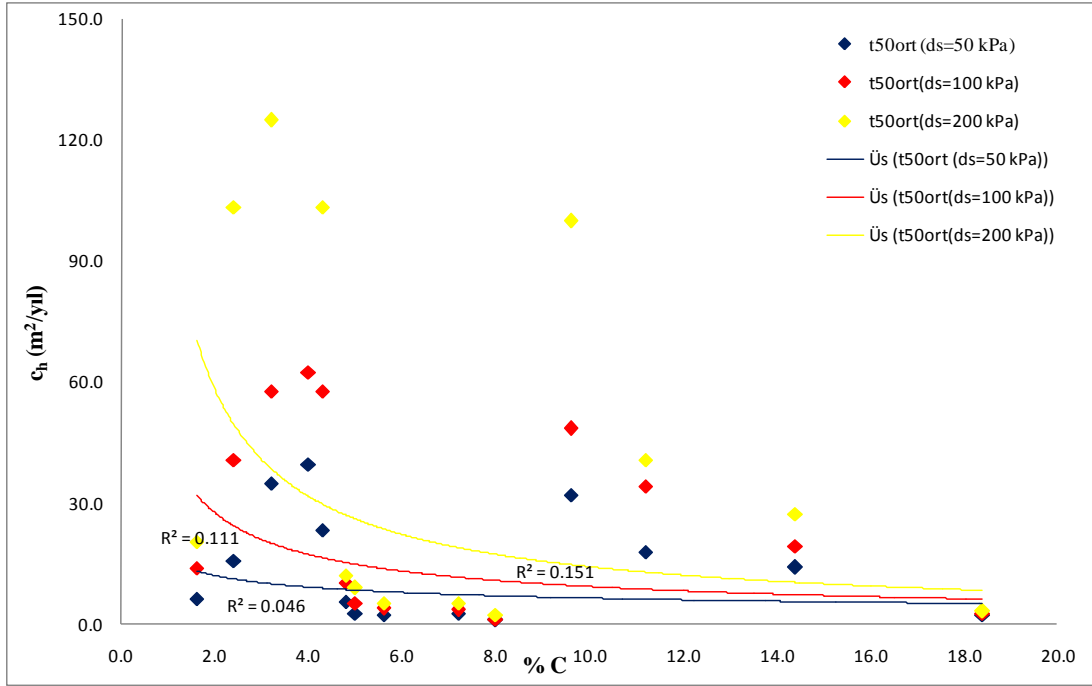
$$U_r = 1 - \frac{\Delta u_w}{\Delta u_{w0}} \quad (5.2)$$

olarak alınmıştır.

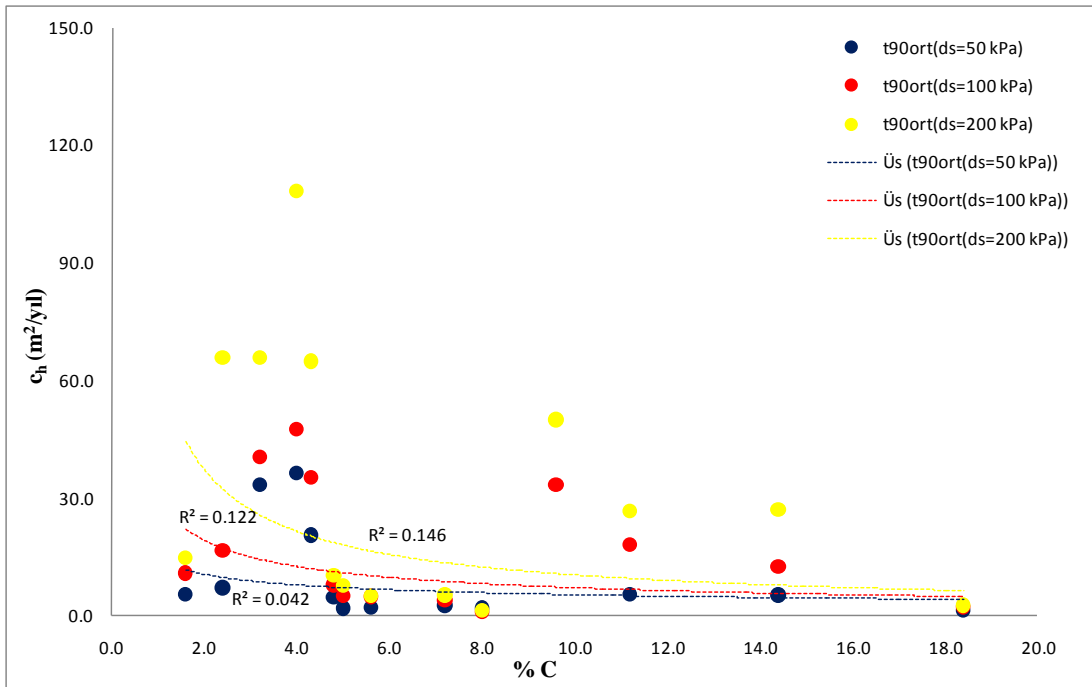
Şekil 5.1’de 50, 100 ve 200 kPa gerilme artış kademelerinde ölçülen t_{50} değerine göre hesaplanan radyal konsolidasyon katsayı değerlerinin değişimi verilmektedir. Şekil 5.2’de ise aynı katsayıların t_{90} değerine göre hesaplanmış büyüklükleri verilmektedir. Bu şekillerdeki deney noktalarından geçirilen eğilim eğrilerinin R^2 değerleri istenen büyüklükten uzak olup bunun yanında %10 kil oranında radyal konsolidasyon katsayısı değerlerinin $5 \text{ m}^2/\text{yıl}$ civarında olduğu söylenebilir.

Tablo 5.4. Sönümlenme deney sonuçları

Numune No	Sınıf TS 1500	σ (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	t_{50} (sn)	t_{90} (sn)	t_{100} (sn)	t_{50} (dk)	t_{90} (dk)	t_{100} (dk)	c_{ro} m ² /yıl (t_{50} ile)		c_{ro} m ² /yıl (t_{90} ile)	
										ortalama	merkezi	ortalama	merkezi
K016		600-500	50	2500	9700	40000	41.7	161.7	666.7	6.0	12.0	5.1	6.7
	ML	700-500	100	1100	4700	28800	18.3	78.3	480.0	13.6	6.6	10.6	13.8
		900-500	200	740	3400	28800	12.3	56.7	480.0	20.2	9.8	14.6	19.0
K020		600-500	50	45	224	480	0.8	3.7	8.0	332.7	161.5	222.3	288.6
	ML	700-500	100	17	88	240	0.3	1.5	4.0	880.6	427.4	565.7	734.7
		900-500	200	5.5	43	120	0.1	0.7	2.0	2721.8	1321.1	1157.8	1503.5
K024		600-500	50	960	7250	14400	16.0	120.8	240.0	15.6	7.6	6.9	8.9
	ML	700-500	100	370	3060	14400	6.2	51.0	240.0	40.5	19.6	16.3	21.1
		900-500	200	145	760	10200	2.4	12.7	170.0	103.2	50.1	65.5	85.1
K032		600-500	50	430	1500	3840	7.2	25.0	64.0	34.8	16.9	33.2	43.1
	ML	700-500	100	260	1240	7200	4.3	20.7	120.0	57.6	27.9	40.1	52.1
		900-500	200	120	760	3840	2.0	12.7	64.0	124.8	60.6	65.5	85.1
K040		600-500	50	380	1380	3840	6.3	23.0	64.0	39.4	19.1	36.1	46.8
	ML	700-500	100	240	1050	7200	4.0	17.5	120.0	62.4	30.3	47.4	61.6
		900-500	200	70	460	1920	1.2	7.7	32.0	213.9	103.8	108.2	140.5
K043		600-500	50	650	2450	7200	10.8	40.8	120.0	23.0	11.2	20.3	26.4
	ML	700-500	100	260	1420	3840	4.3	23.7	64.0	57.6	27.9	35.1	45.5
		900-500	200	145	770	7200	2.4	12.8	120.0	103.2	50.1	64.7	84.0
K048		600-500	50	2800	11000	28800	46.7	183.3	480.0	5.3	2.6	4.5	5.9
	ML	700-500	100	1500	6500	14400	25.0	108.3	240.0	10.0	4.8	7.7	9.9
		900-500	200	1250	5000	14400	20.8	83.3	240.0	12.0	5.8	10.0	12.9
K050		600-500	50	6300	30000	86400	105.0	500.0	1440.0	2.4	1.2	1.7	2.2
	ML	700-500	100	3000	10500	28800	50.0	175.0	480.0	5.0	2.4	4.7	6.2
		900-500	200	1700	6700	28800	28.3	111.7	480.0	8.8	4.3	7.4	9.6
K056		600-500	50	7200	28800	46000	120.0	480.0	766.7	2.1	1.0	1.7	2.2
	ML	700-500	100	4000	10700	28800	66.7	178.3	480.0	3.7	1.8	4.7	6.0
		900-500	200	3000	10200	46000	50.0	170.0	766.7	5.0	2.4	4.9	6.3
K072		600-500	50	6000	21000	28800	100.0	350.0	480.0	2.5	1.2	2.4	3.1
	ML	700-500	100	4400	13500	21600	73.3	225.0	360.0	3.4	1.7	3.7	4.8
		900-500	200	3000	10000	12600	50.0	166.7	210.0	5.0	2.4	5.0	6.5
K080		600-500	50	17000	30000	150000	283.3	500.0	2500.0	0.9	0.4	1.7	2.2
	ML	700-500	100	16000	60000	120000	266.7	1000.0	2000.0	0.9	0.5	0.8	1.1
		900-500	200	7000	46000	120000	116.7	766.7	2000.0	2.1	1.0	1.1	1.4
K096		600-500	50	470	2500	3800	7.8	41.7	63.3	31.9	15.5	19.9	25.9
	ML	700-500	100	310	1500	7000	5.2	25.0	116.7	48.3	23.4	33.2	43.1
		900-500	200	150	1000	3800	2.5	16.7	63.3	99.8	48.4	49.8	64.7
K112		600-500	50	850	9500	72000	14.2	158.3	1200.0	17.6	8.5	5.2	6.8
	ML	700-500	100	440	2800	22000	7.3	46.7	366.7	34.0	16.5	17.8	23.1
		900-500	200	370	1880	28800	6.2	31.3	480.0	40.5	19.6	26.5	34.4
		600-500	50	1080	13000	150000	18.0	216.7	2500.0	13.9	6.7	3.8	5.0
K 144	MI	700-500	100	780	5200	86400	13.0	86.7	1440.0	19.2	9.3	9.6	12.4
		900-500	200	550	2400	28800	9.2	40.0	480.0	27.2	13.2	20.7	26.9
		600-500	50	6700	44000	200000	111.7	733.3	3333.3	2.2	1.1	1.1	1.5
K184	CH	700-500	100	5900	24000	160000	98.3	400.0	2666.7	2.5	1.2	2.1	2.7
		900-500	200	5000	21000	200000	83.3	350.0	3333.3	3.0	1	2.4	3.1



Şekil 5.1. t_{50} ile hesaplanan radyal konsolidasyon katsayısı değerleri



Şekil 5.2. t_{90} ile hesaplanan radyal konsolidasyon katsayısı değerleri

Ek-II'de verilen deney sonuçları incelendiğinde kil oranı açısından %10 değerine sahip numunelerin sönümlenme eğri tipi birbirine benzer şekilde parabolik olarak yumuşak şekilde azalan bir tip sergilerken dikkat çekici bir şekilde %10'dan daha fazla kil oranına sahip numunelerin sönümlenme eğrileri drenaj vanasının açılmasıyla birlikte sert ve ani bir düşüş yapan boşluk suyu basıncı değerinin hemen sonrasında yükleme esnasında aldığı en büyük değeri aşmayacak büyüklükte artması ve daha sonra da yine parabolik yumuşak bir eğri şeklinde azalması ile sonuçlanmaktadır.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında siltli zeminlerin sıvılaşıma potansiyelinin belirlenmesinde, radyal konsolidasyon katsayısını ölçmede kullanılan hidrolik hücre deney sonuçlarının katkıda bulunması hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı kil oranlarına sahip 16 farklı zemin karışımı kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında laboratuvarında çarpmalı alet ve düşen koni penetrasyon yöntemi ile likit limit deneyleri, plastik limit deneyleri, zemin danelerinin özgül ağırlığının tayini için piknometre deneyi, dane çapı dağılımının bulunması için pipet yöntemi ve hidrometre yöntemi ile çöktürme deneyleri yapılmıştır. Zeminlerin sönümlenme ve radyal konsolidasyon katsayılarını belirlemek için boşluk suyu basıncı okumalı hidrolik hücrede sönümlenme deneyleri yapılmıştır.

Siltli numuneler üzerinde yapılan deneylerde kil oranının artması ile t_{50} ve t_{90} değerlerinde artış meydana gelmiş, bu durumda da hesaplanan radyal konsolidasyon katsayısı değerleri artan kil oranı ile azalmıştır.

Numunelere uygulanan gerilme kademesi arttıkça ölçülen sönümlenme zamanlarının azaldığı, dolayısı ile konsolidasyon katsayısı değerlerinin arttığı izlenmiştir.

t_{50} ve t_{90} değerine göre hesaplanmış radyal konsolidasyon katsayısı değerlerine bakıldığında kil oranına göre değişim eğrilerinin eğilim çizgilerinin R^2 değerleri istenen büyüklükten uzak olup bunun yanında %10 kil oranında radyal konsolidasyon katsayısı değerlerinin $5 \text{ m}^2/\text{yıl}$ civarında olduğu söylenebilir.

Sönümlenme deney sonuçları incelendiğinde kil oranı açısından %10 değerine sahip numunelerin sönümlenme eğri tipi birbirine benzer şekilde parabolik olarak yumuşak

şekilde azalan bir tip sergilerken dikkat çekici bir şekilde %10'dan daha fazla kil oranına sahip numunelerin sönümlenme eğrileri drenaj vanasının açılmasıyla birlikte sert ve ani bir düşüş yapan boşluk suyu basıncı değerinin hemen sonrasında yükleme esnasında aldığı en büyük değeri aşmayacak büyüklükte artması ve daha sonra da yine parabolik yumuşak bir eğri şeklinde azalması ile sonuçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

ASTM Designation D 43 1 8-95a, Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils.

BRAY, J.D. , SAIONC, R.B., Assessment of Liquefaction Susceptibility of Fine Grained Soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 27:2:31-41. 2006

BOL, E., ÖNALP, A., AREL, E., SERT, S., ÖZOCAK, A., Liquefaction of Silts: The Adapazarı Criteria. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:859-873. 2010

CERNICA, J.N., Geotechnical Engineering: Soil Mechanics, John WILEY & SONS,U.S.A., pp.453, 1995

HEAD, K.H., Manual of Soil Laboratory Testing, Vol: 1-2-3, Pentech Press, London, pp: 1240. 1985

IDRISS, I.M., BOULANGER, R.W., Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes,. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 26:115-130. 2006

KANBUR, M.A., Siltlerde sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde boşluk geometrisinin etkisi, SAÜ FBE. 2011

ÖNALP, A., Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği, Birsen yayınevi 3.baskı 2007

ÖNALP, A., ve AREL, E., Siltlerin Sıvılaşma Yeteneği: Adapazarı Kriteri,, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. 2002

ÖZOCAK, A., ÖNALP, A., ve BOL, E., İnce Daneli Zeminlerde Laboratuvar Sönümlenme Deneyleri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi, 16-17 Ekim 2008, Selçuk Üniversitesi, Konya 2008

ROWE, P.W., BARDEN, L., A New Consolidation Cell, Geotechnique, Vol. 16 (2), 162. 1966

SCOTT, R.F., Principles of Soil Mechanics, Addison-Wesley Publishing Co., READING, Mass., 1963

TERZAGHI, K., PECK, R.B., Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & SONS, U.S.A., 719pp., 1967

TS 1500. İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Ankara, 2000

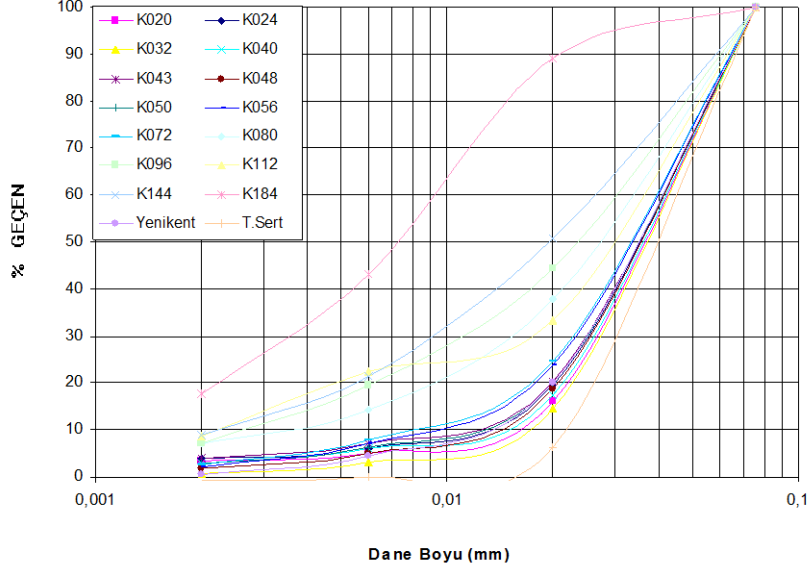
TS 1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Türk Standartları, Bakanlıklar, Ankara, 2006

UZUNER, B., Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, KTÜ 1990

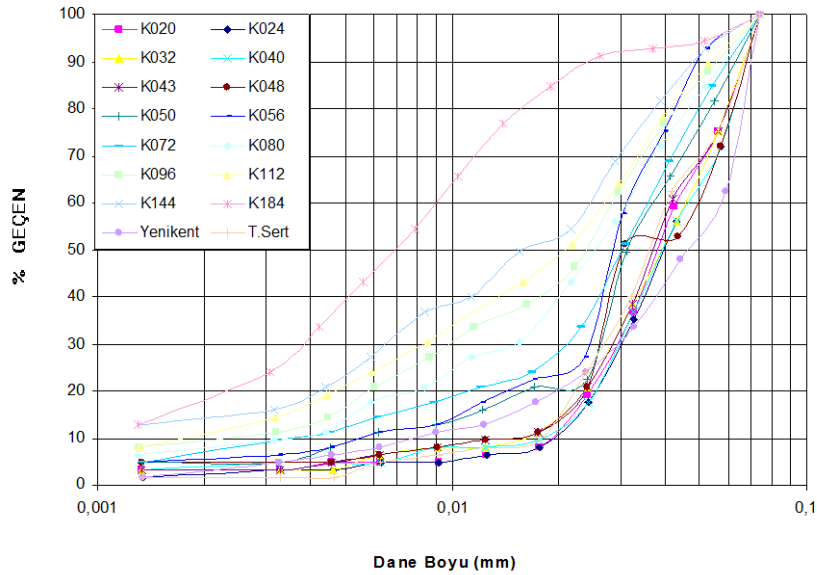
WANG, W.S., Some Findings in Soil Liquefaction,, Research Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing 1979

EKLER

EK I.a. Dane boyutu dağılım eğrileri (Pipet)

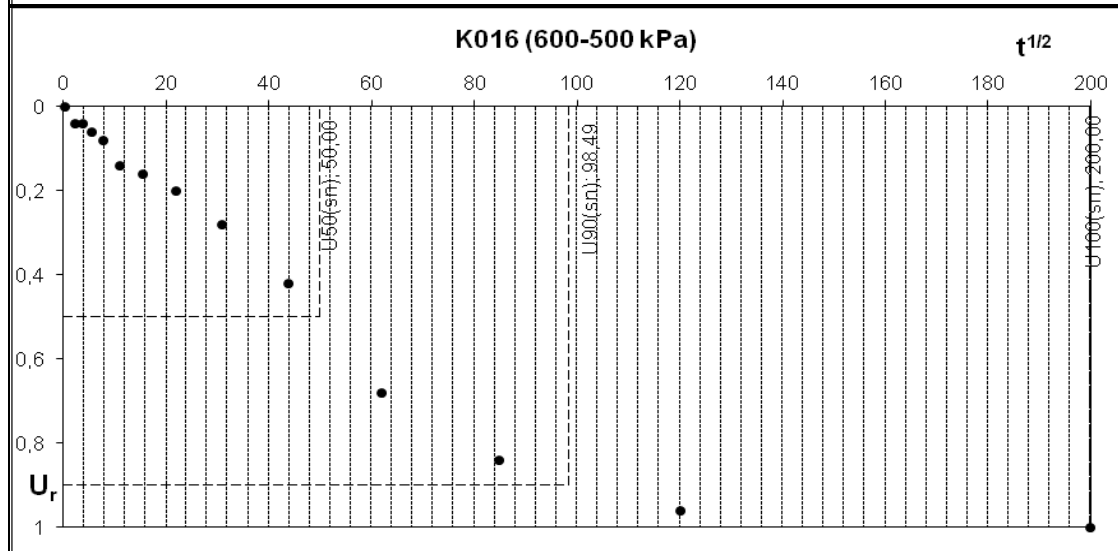
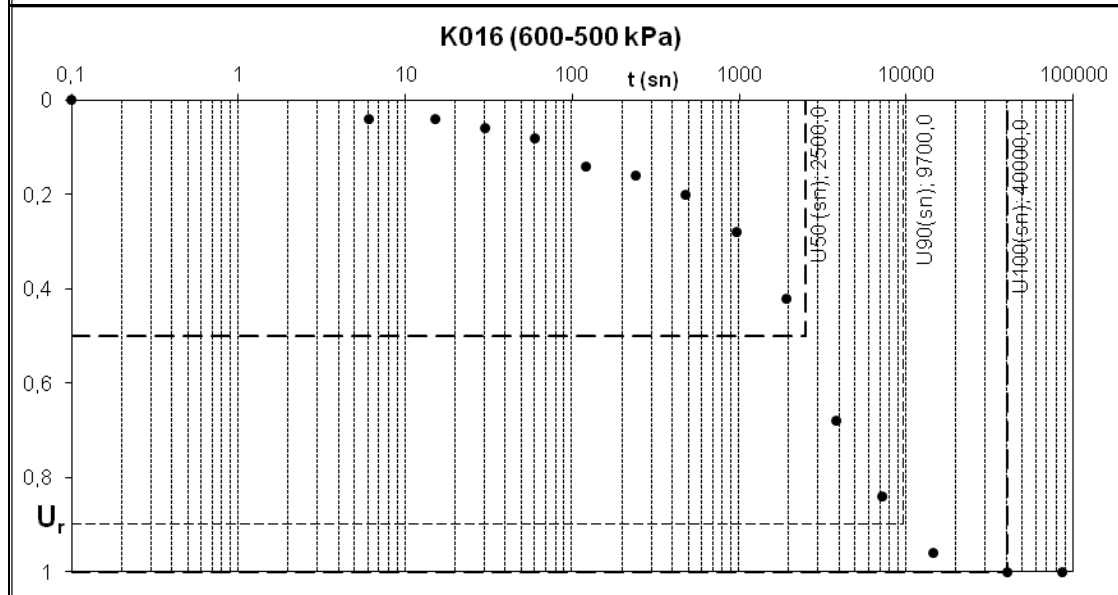
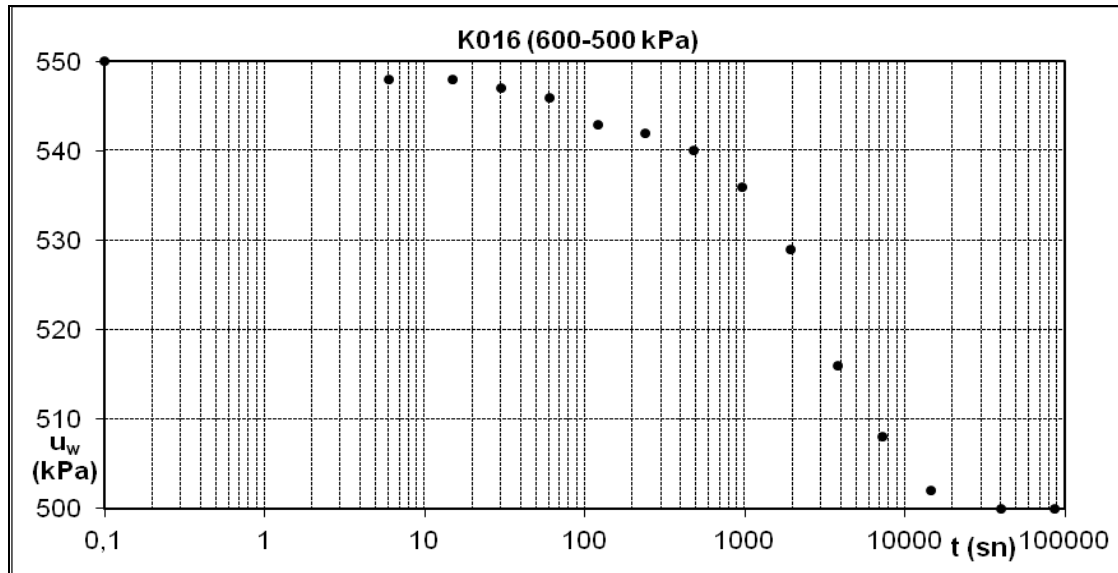


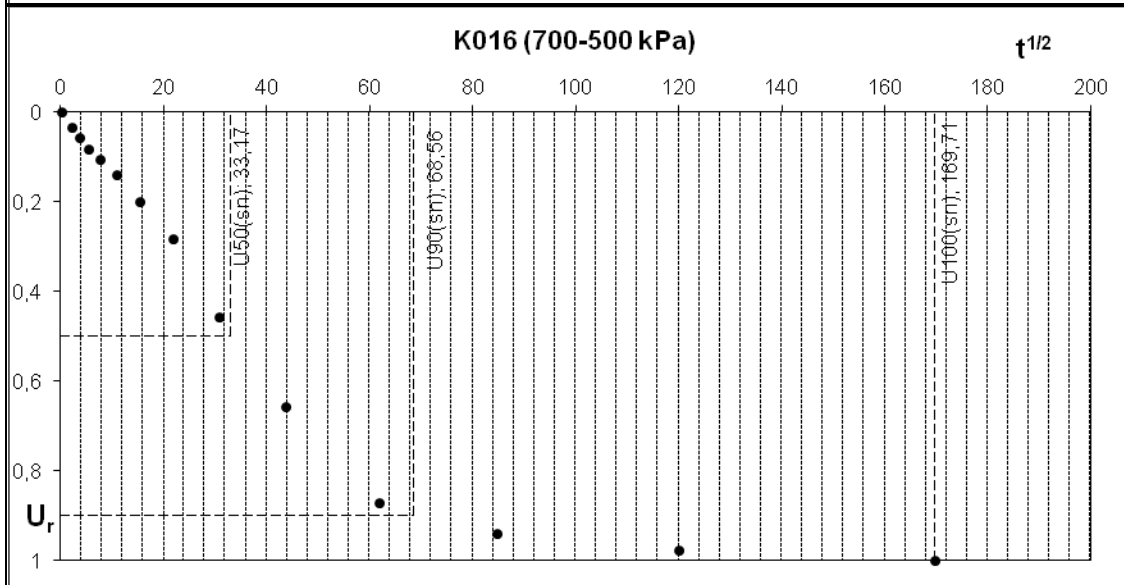
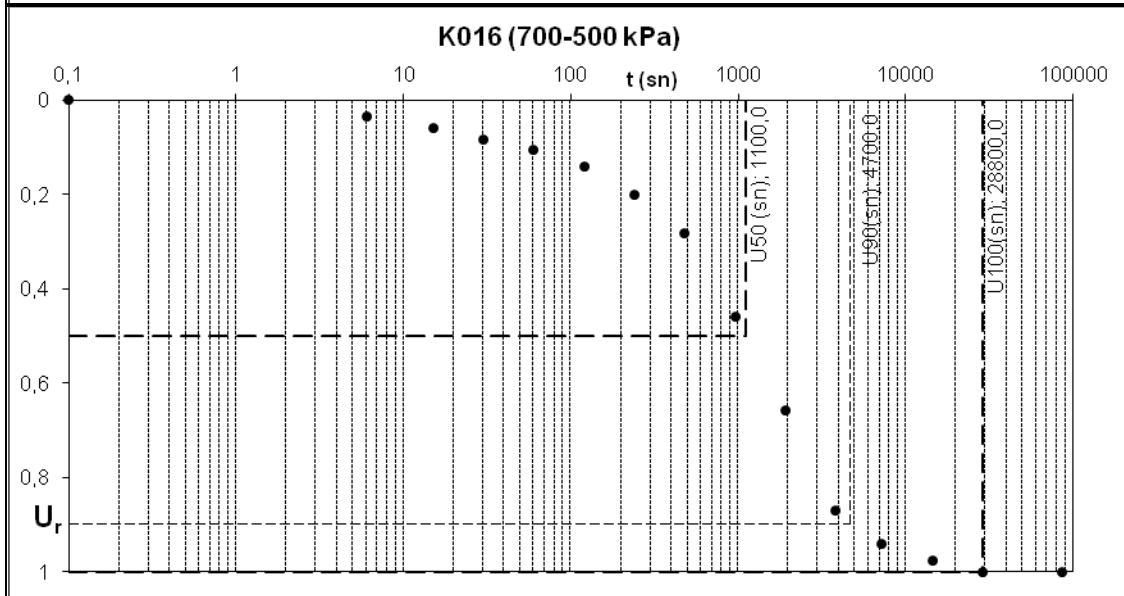
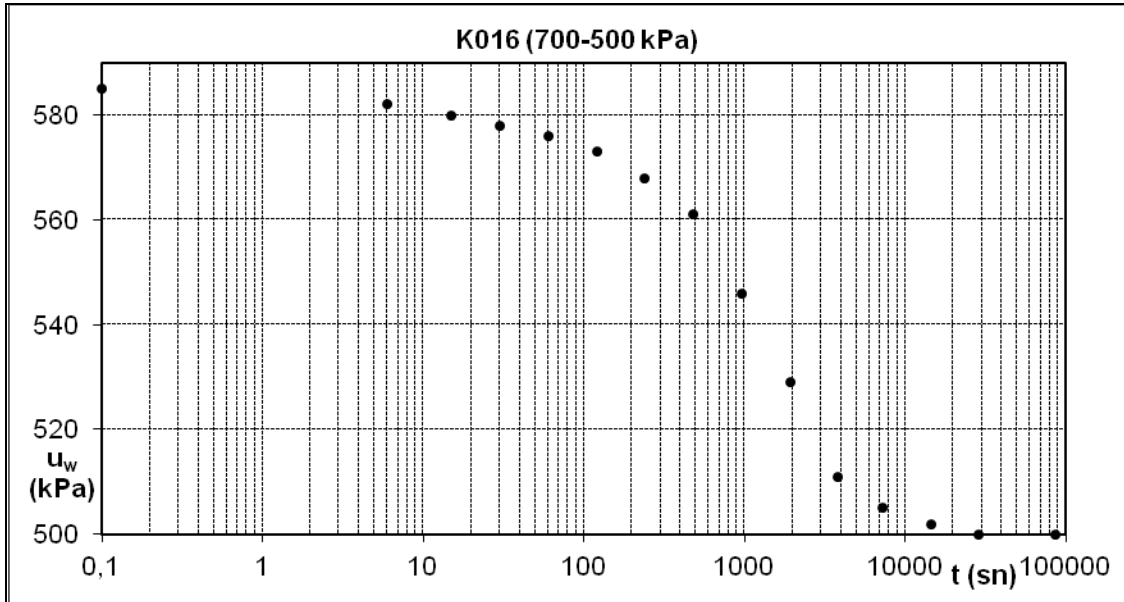
EK I.b. Dane boyutu dağılım eğrileri (Hidrometre)

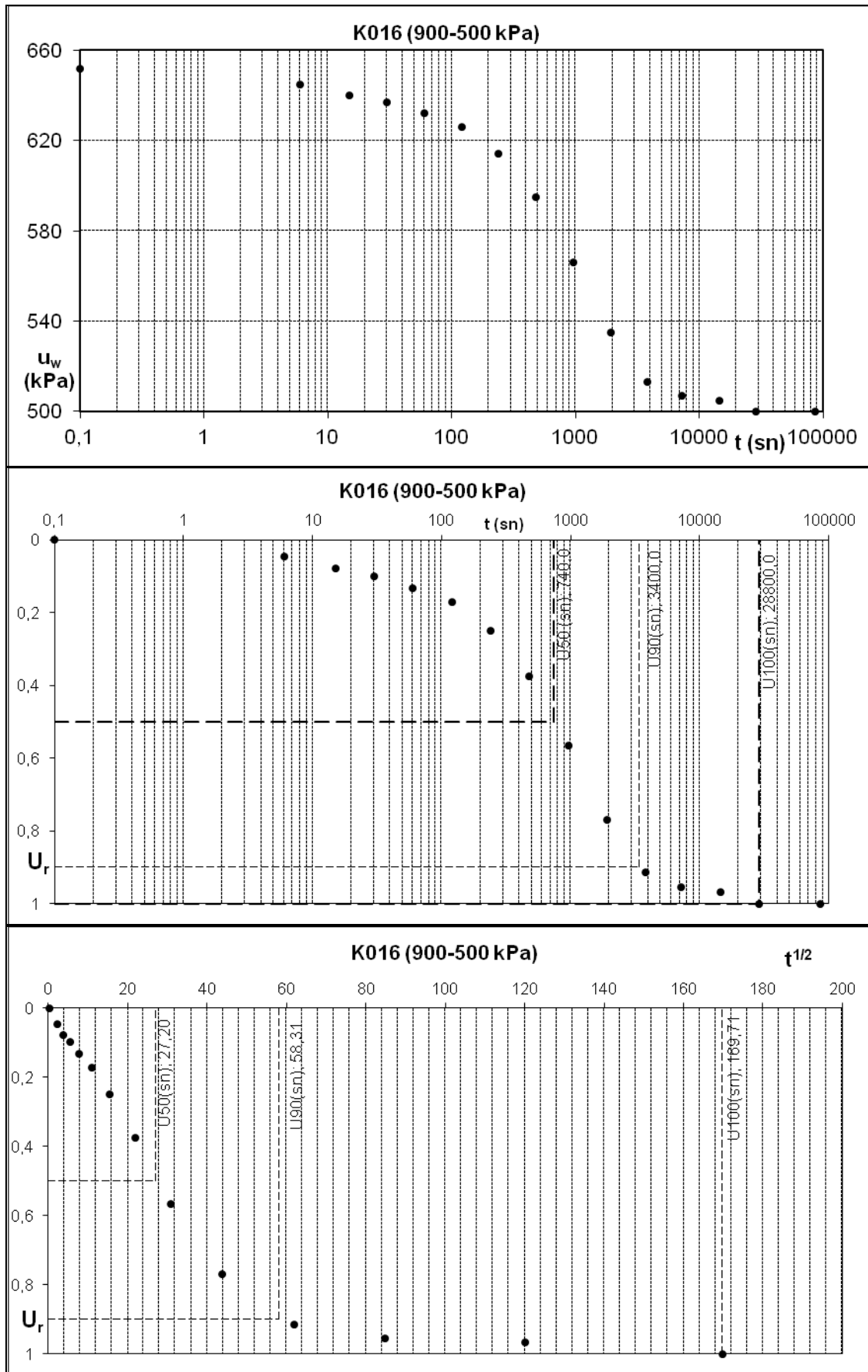


EK-II**Sönümlenme Eğrileri**

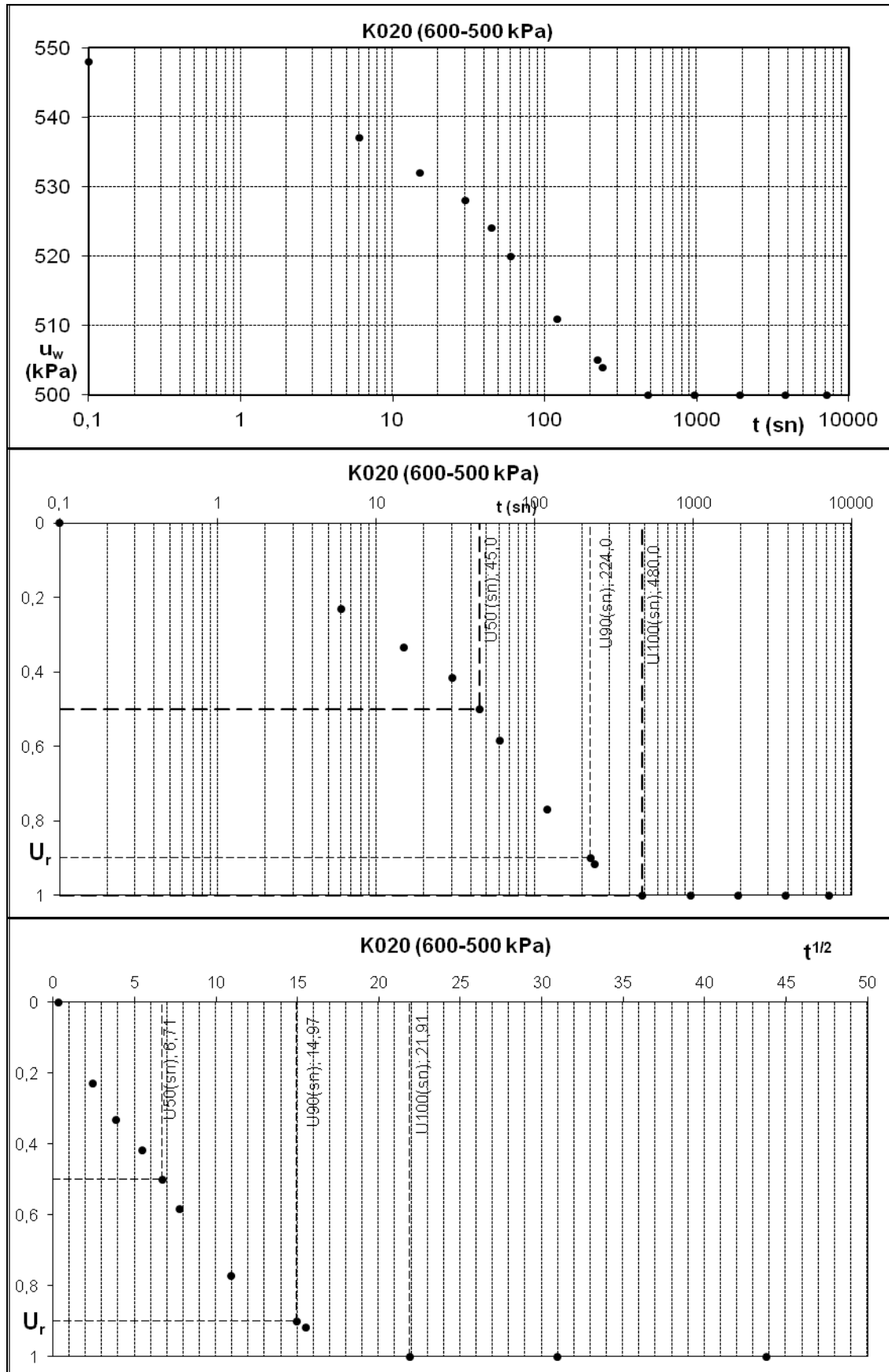
K016

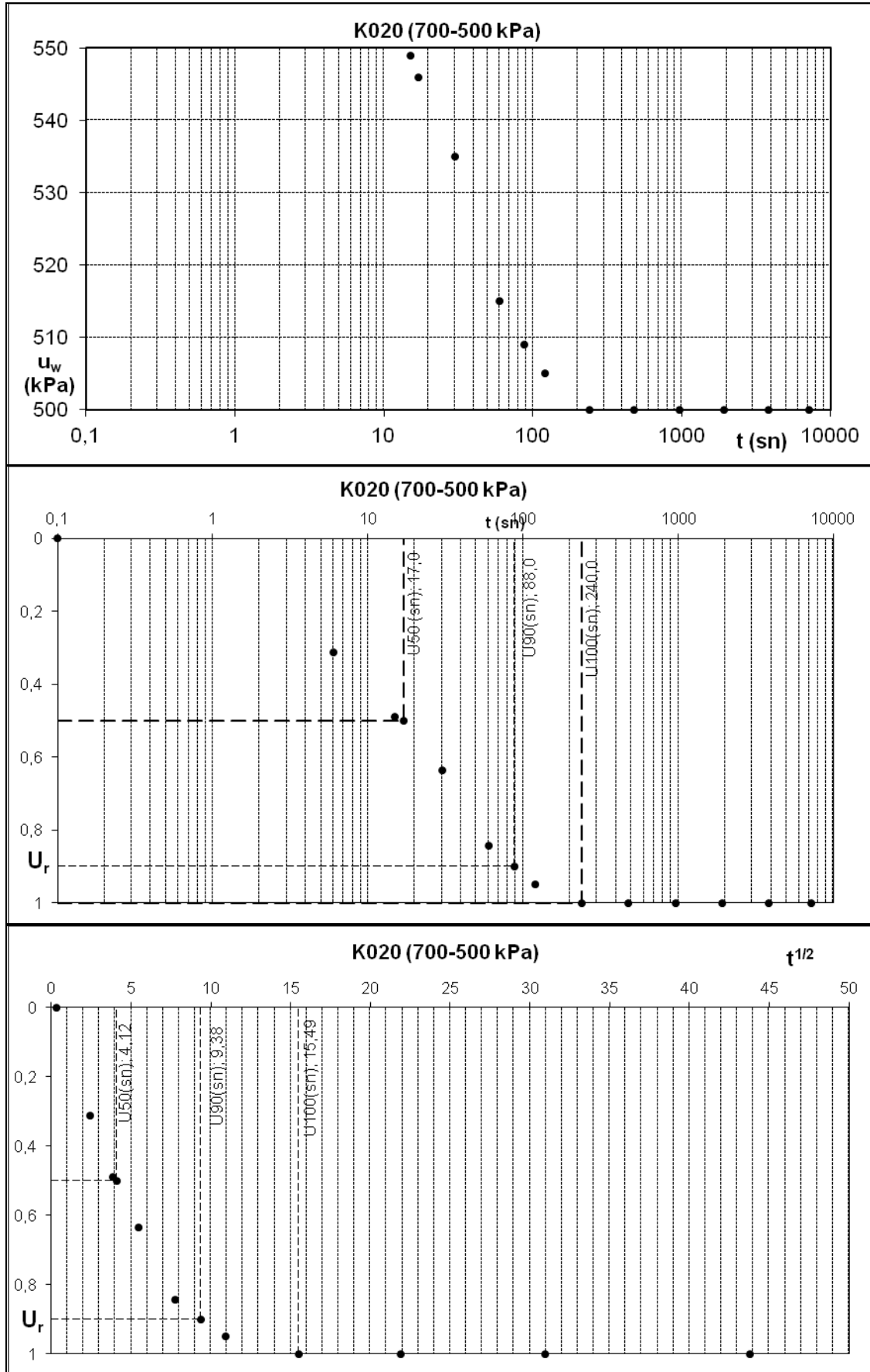


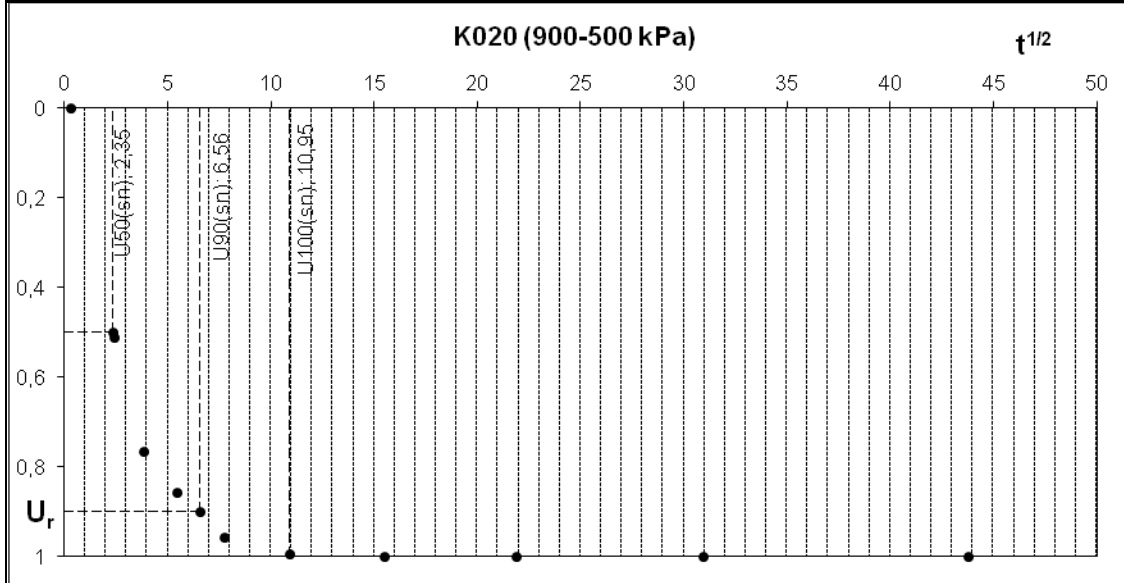
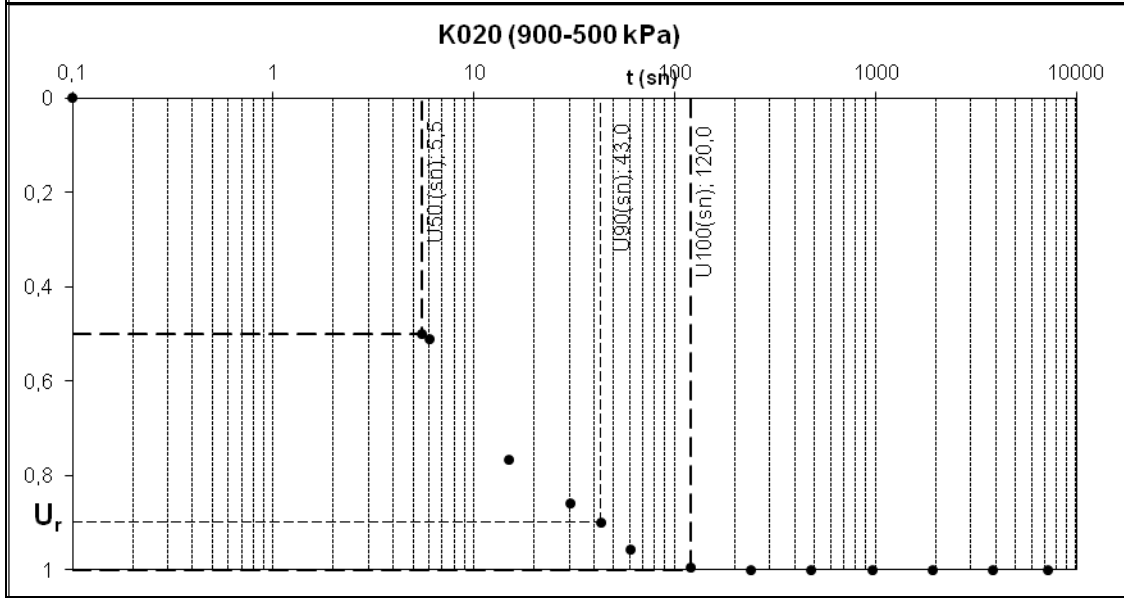
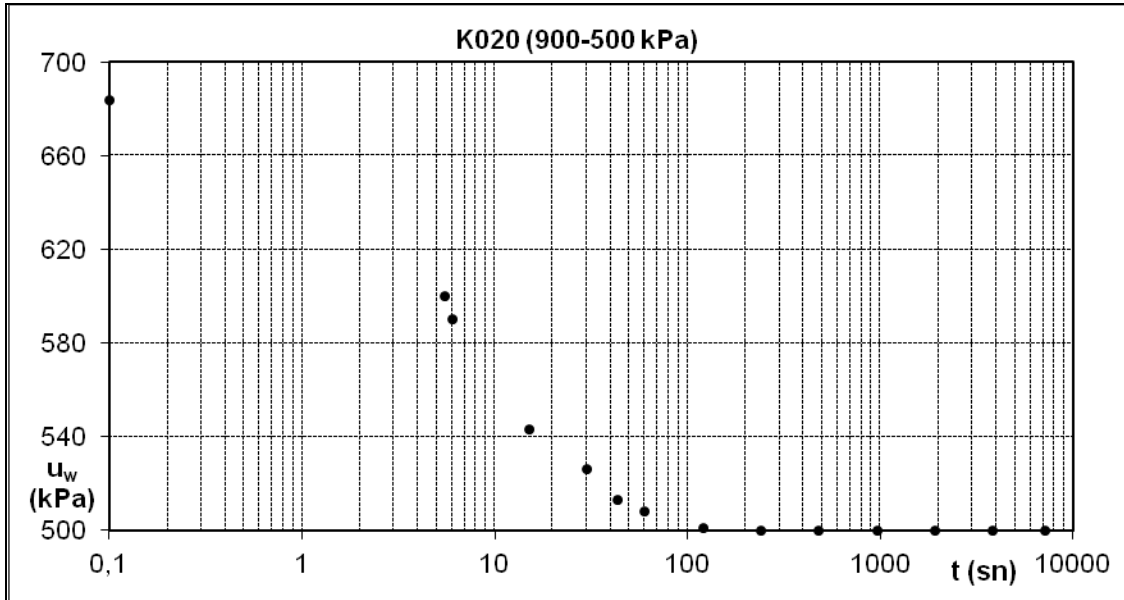




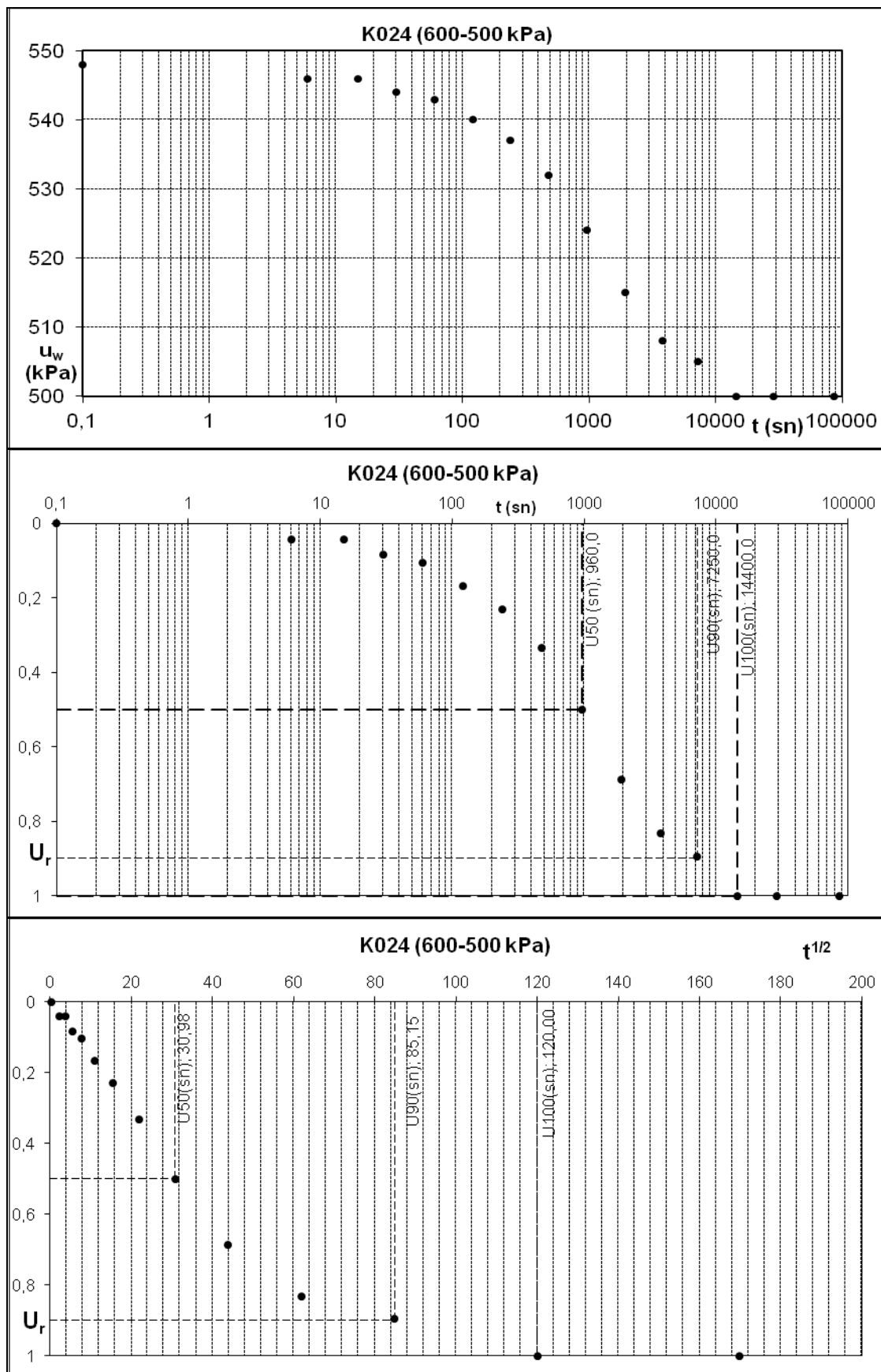
K020

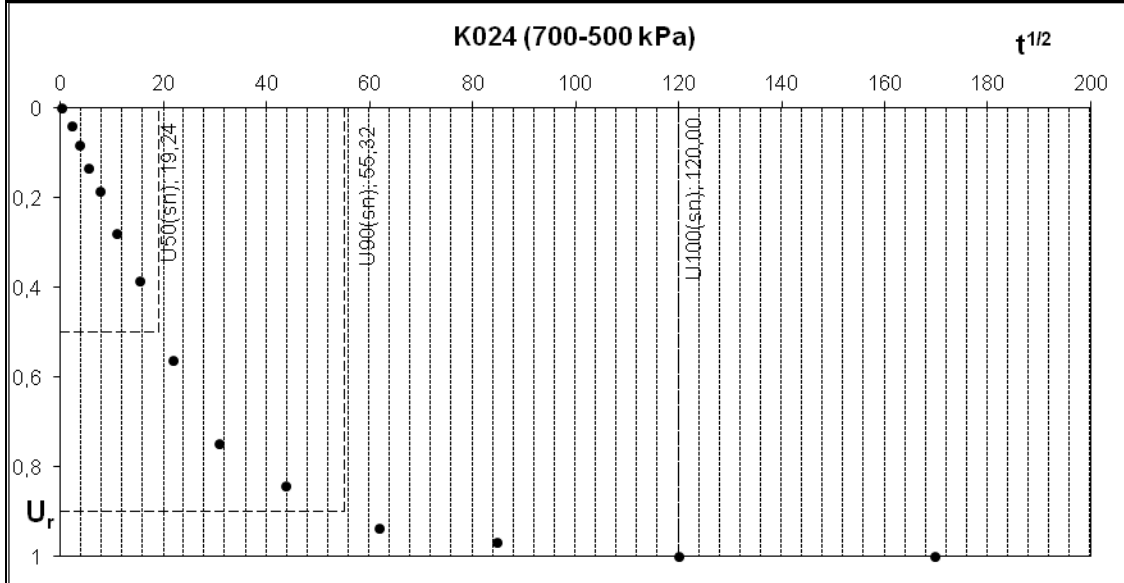
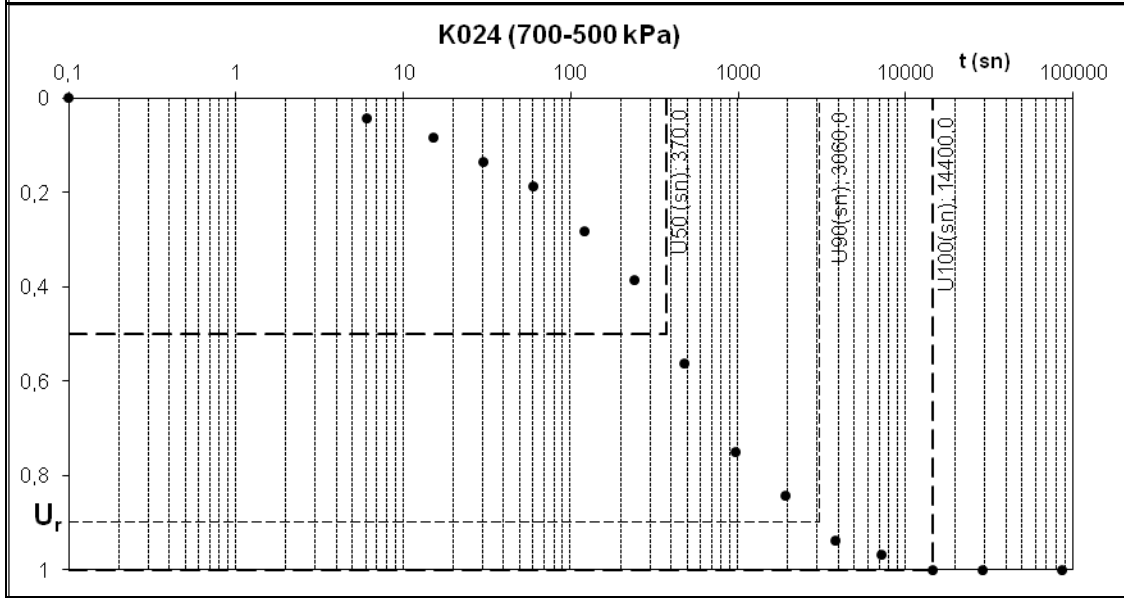
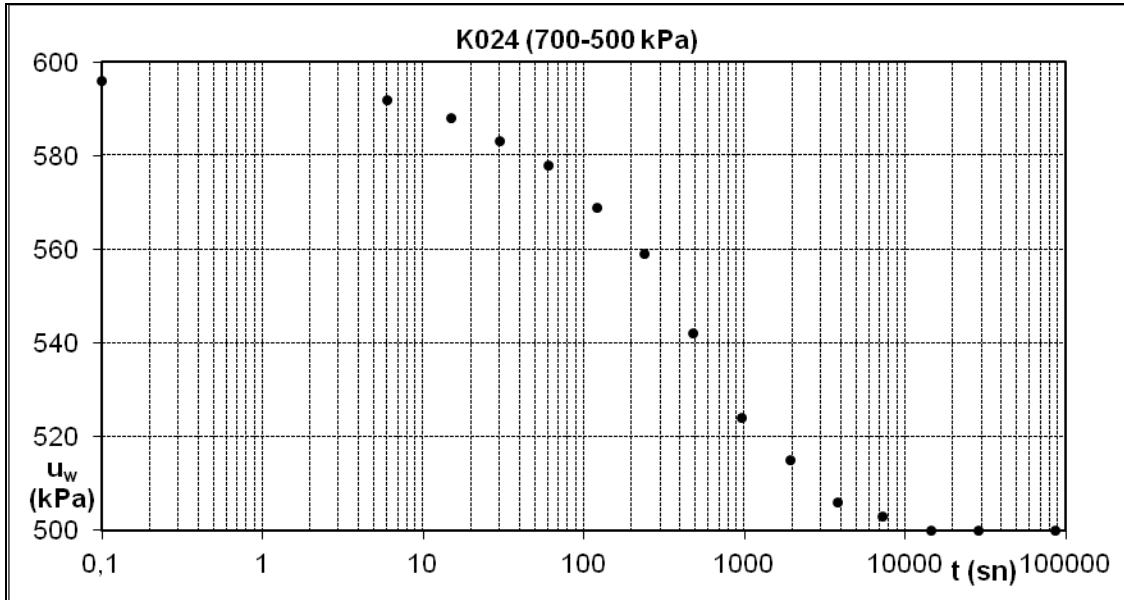


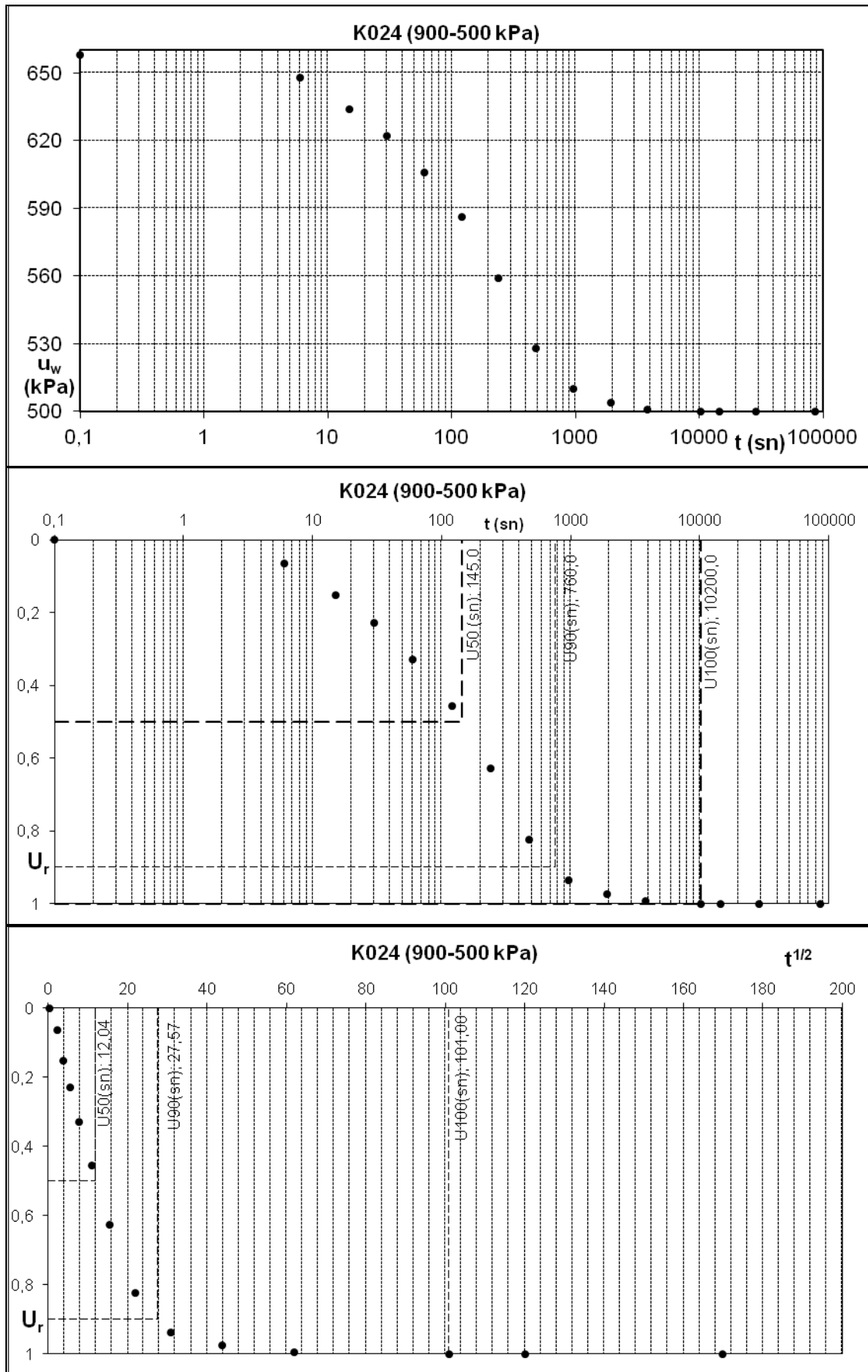




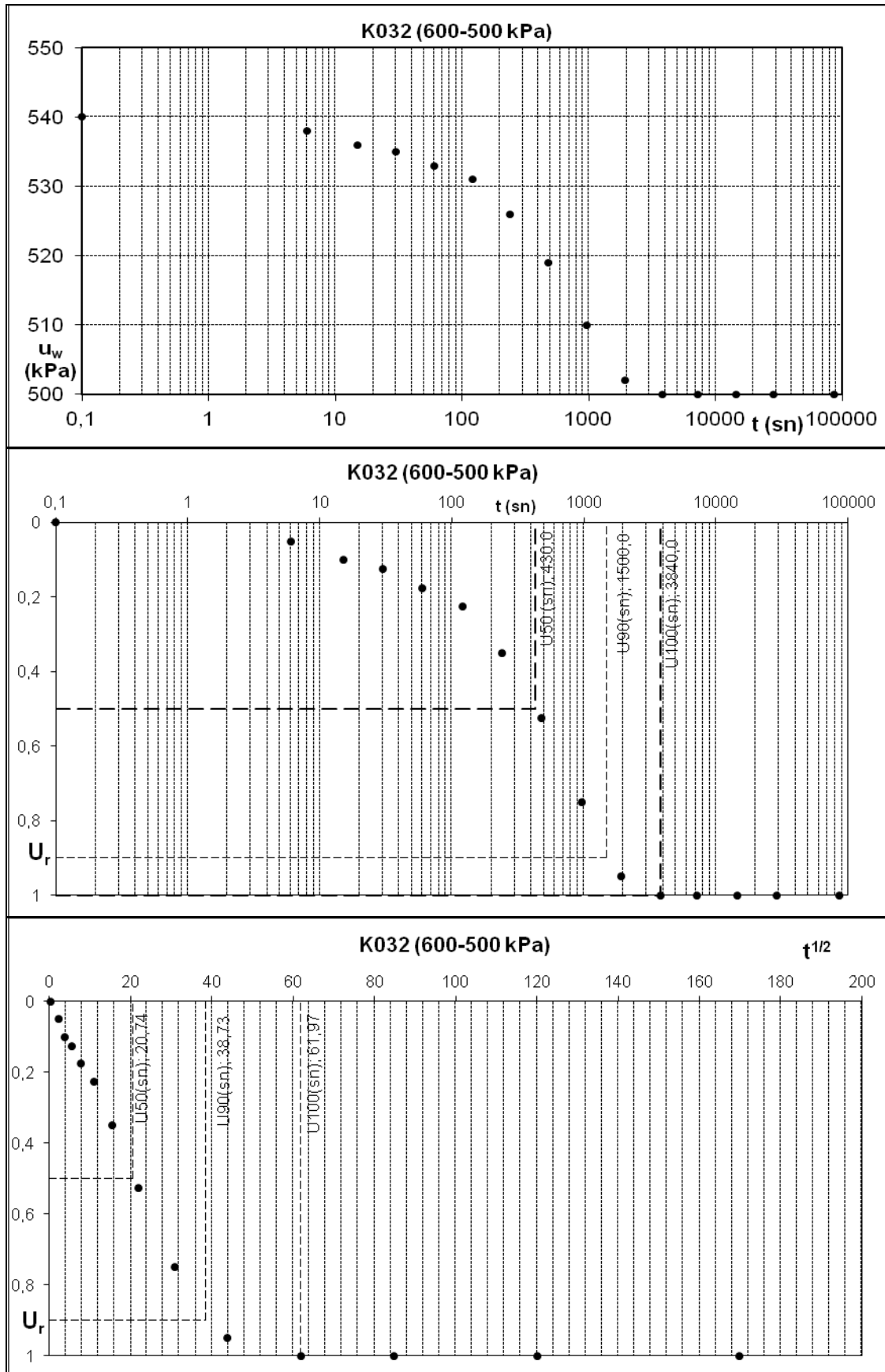
K024

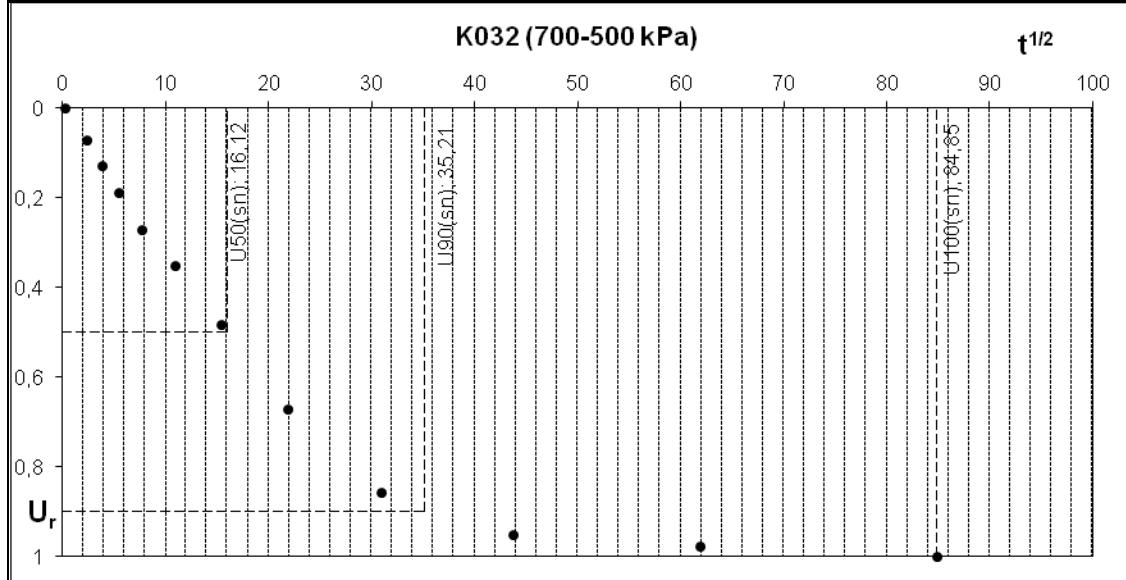
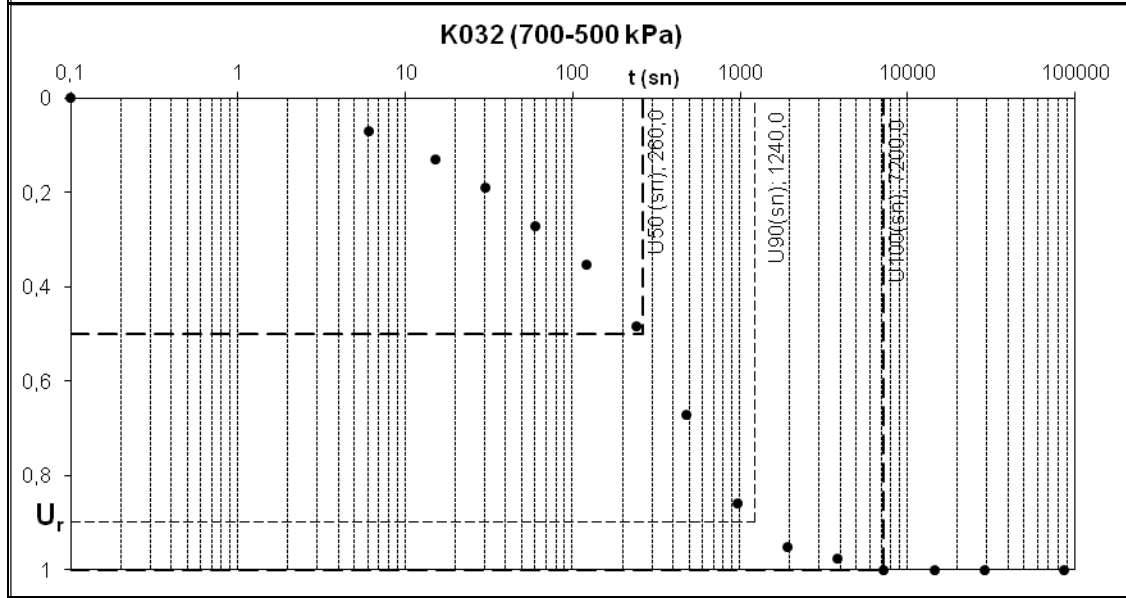
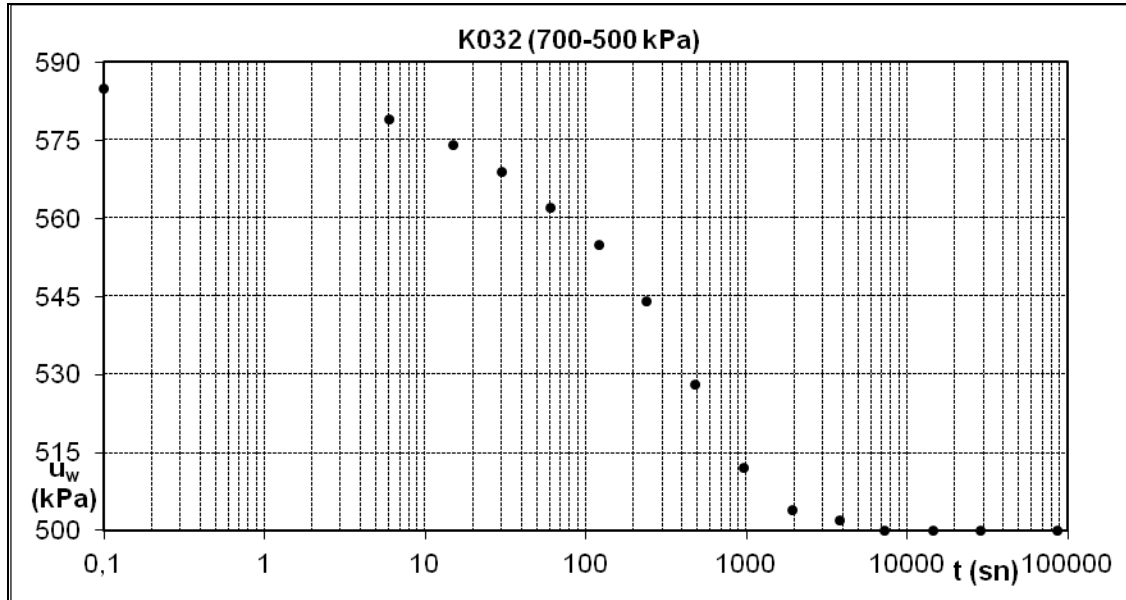


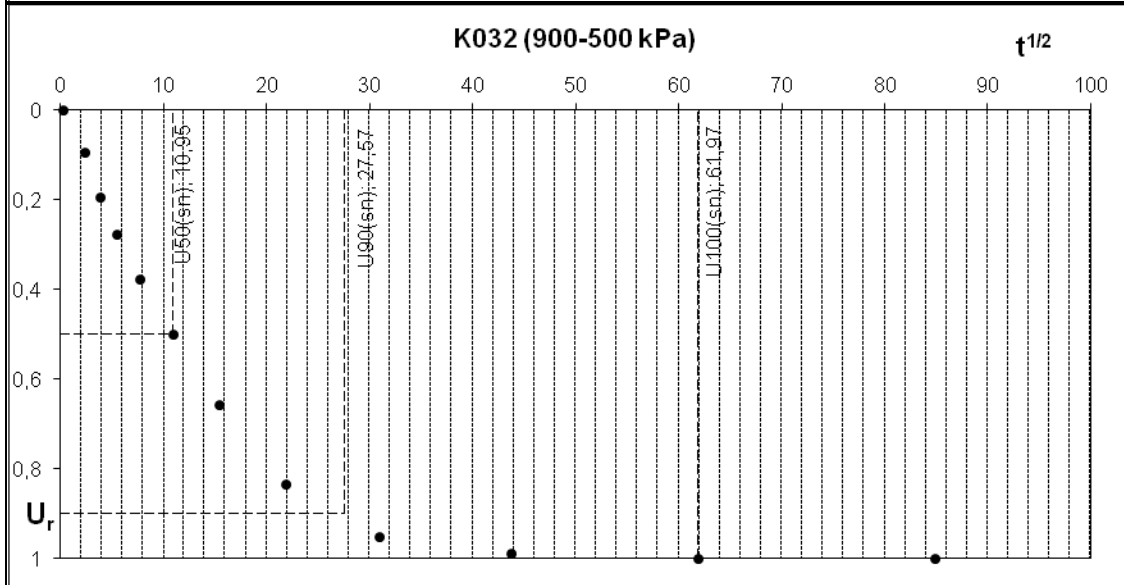
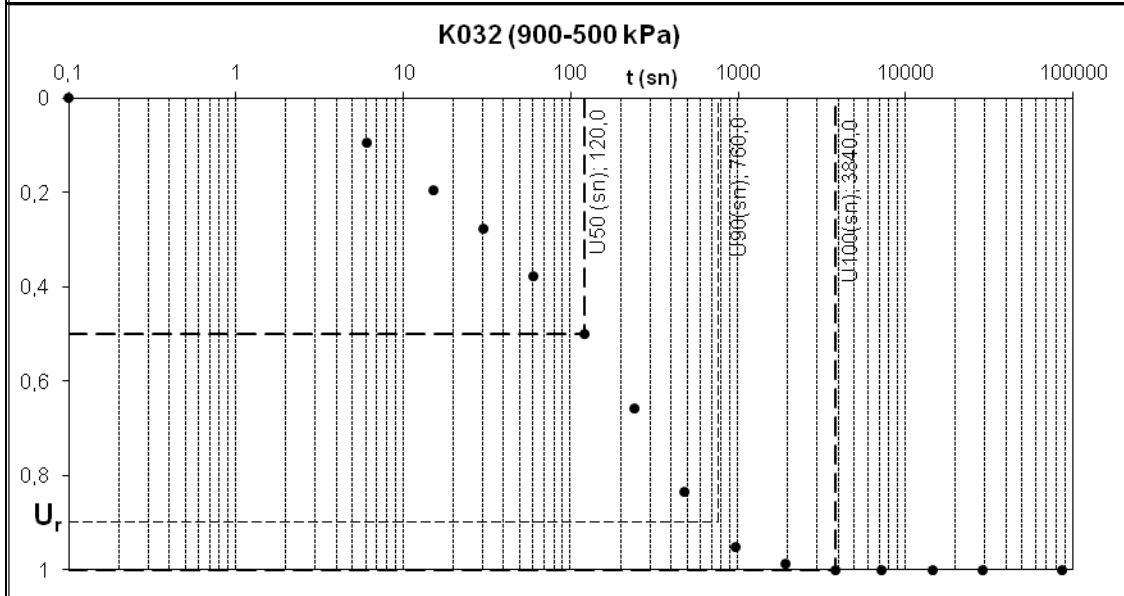
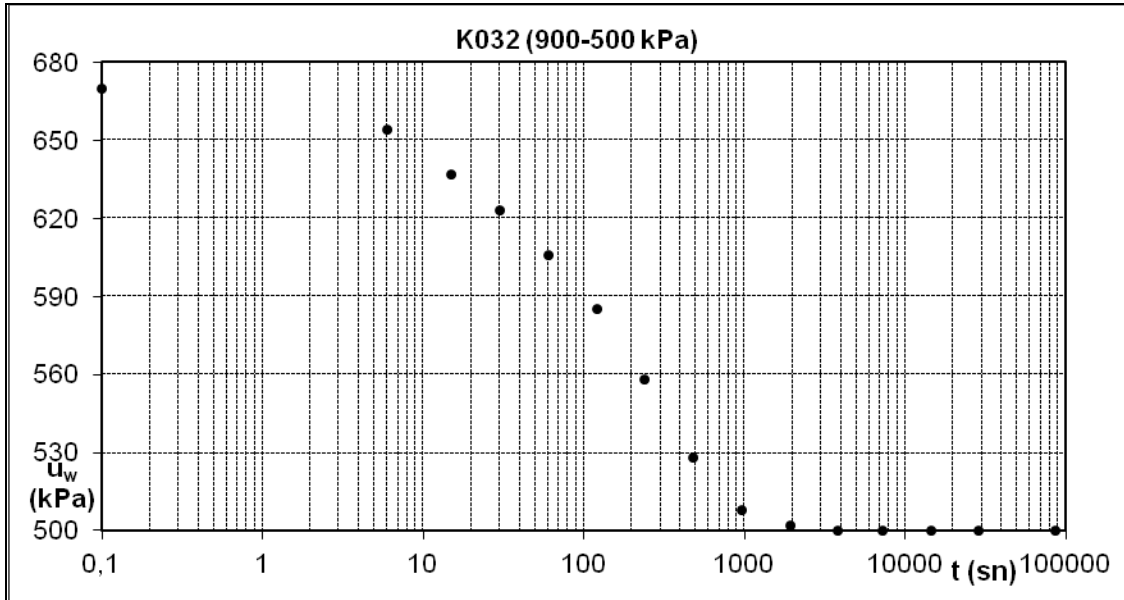




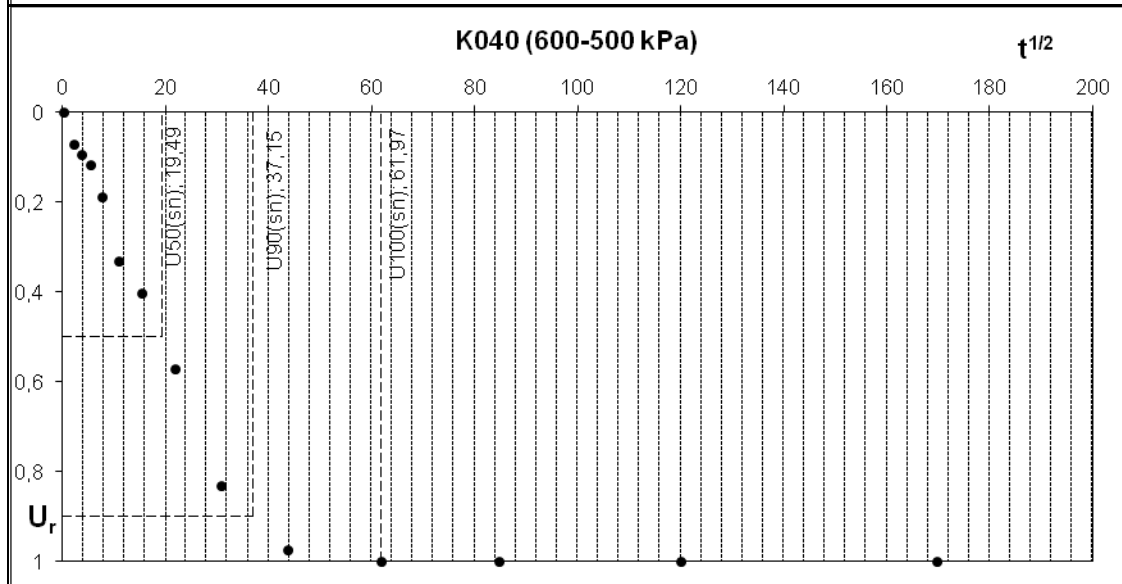
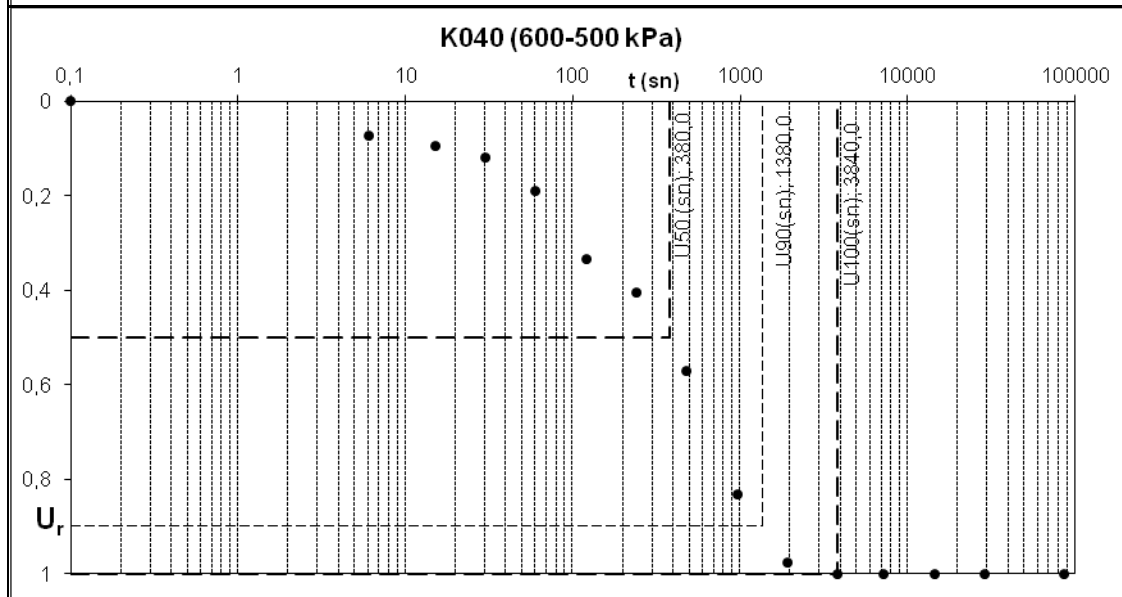
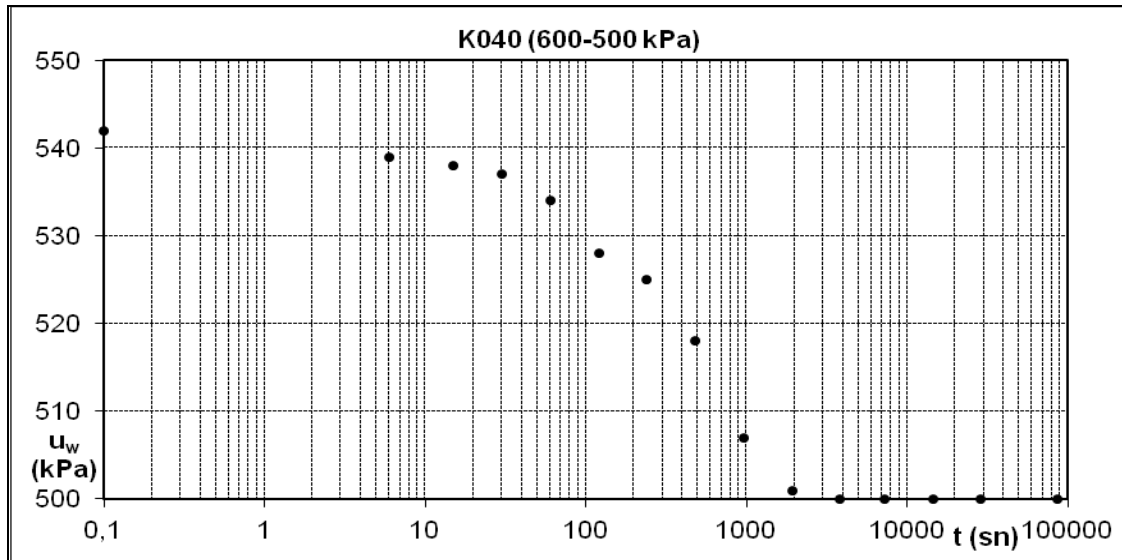
K032

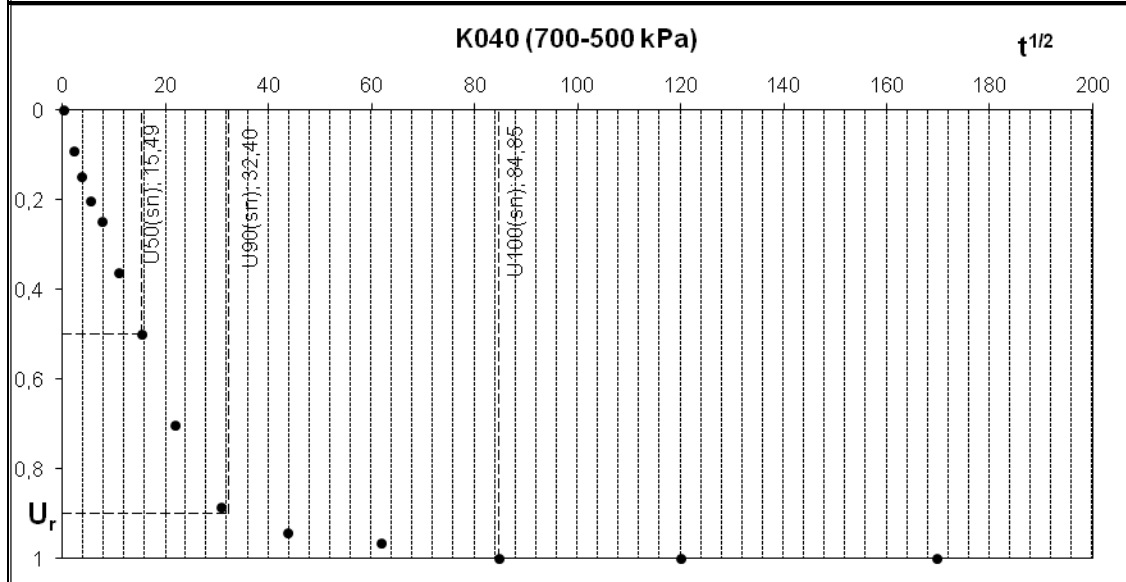
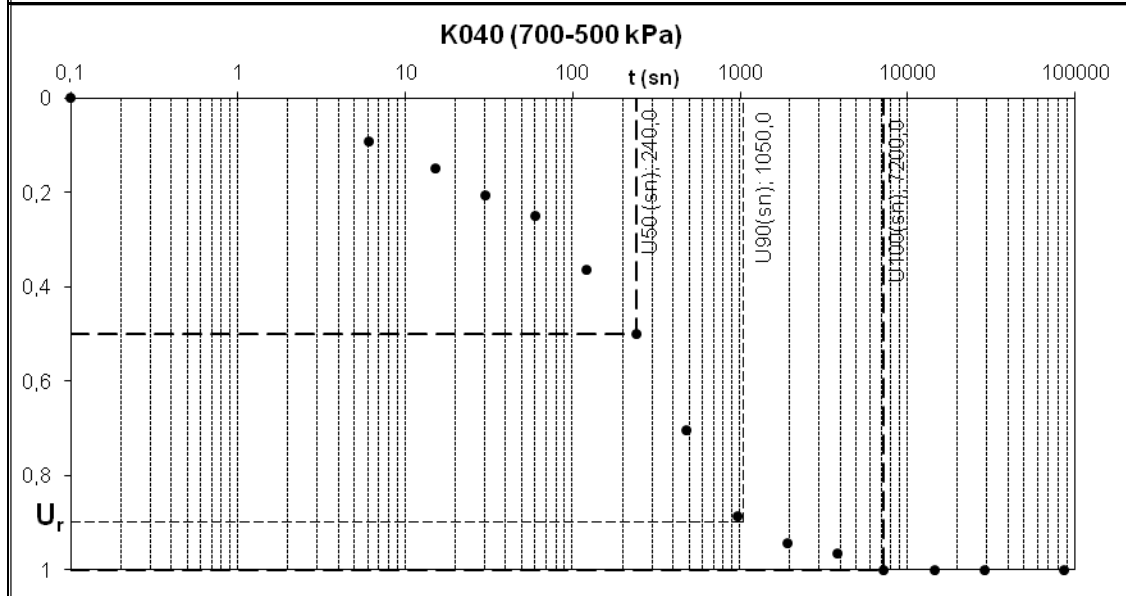
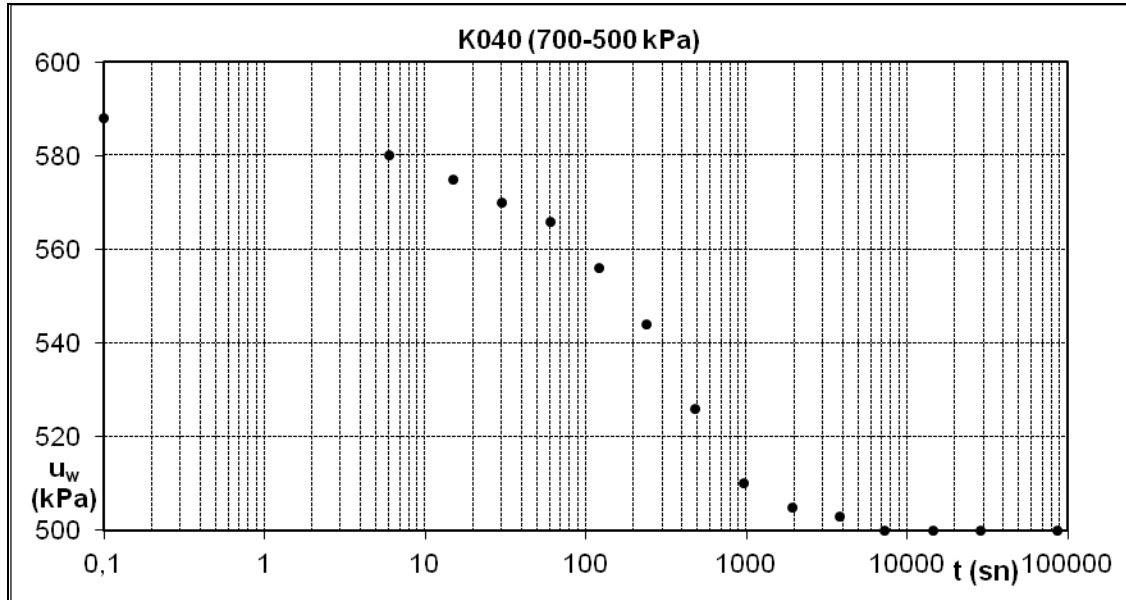


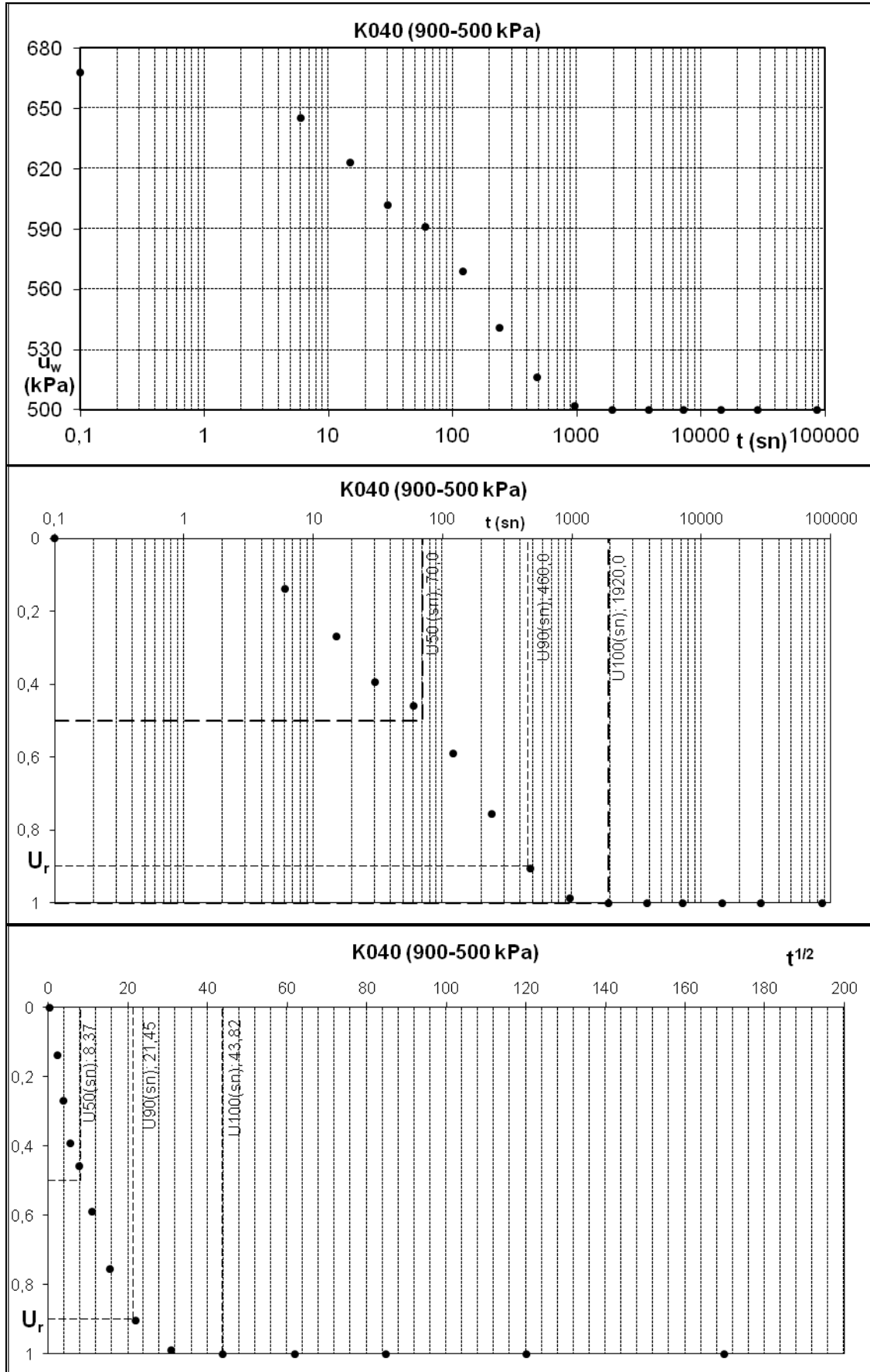




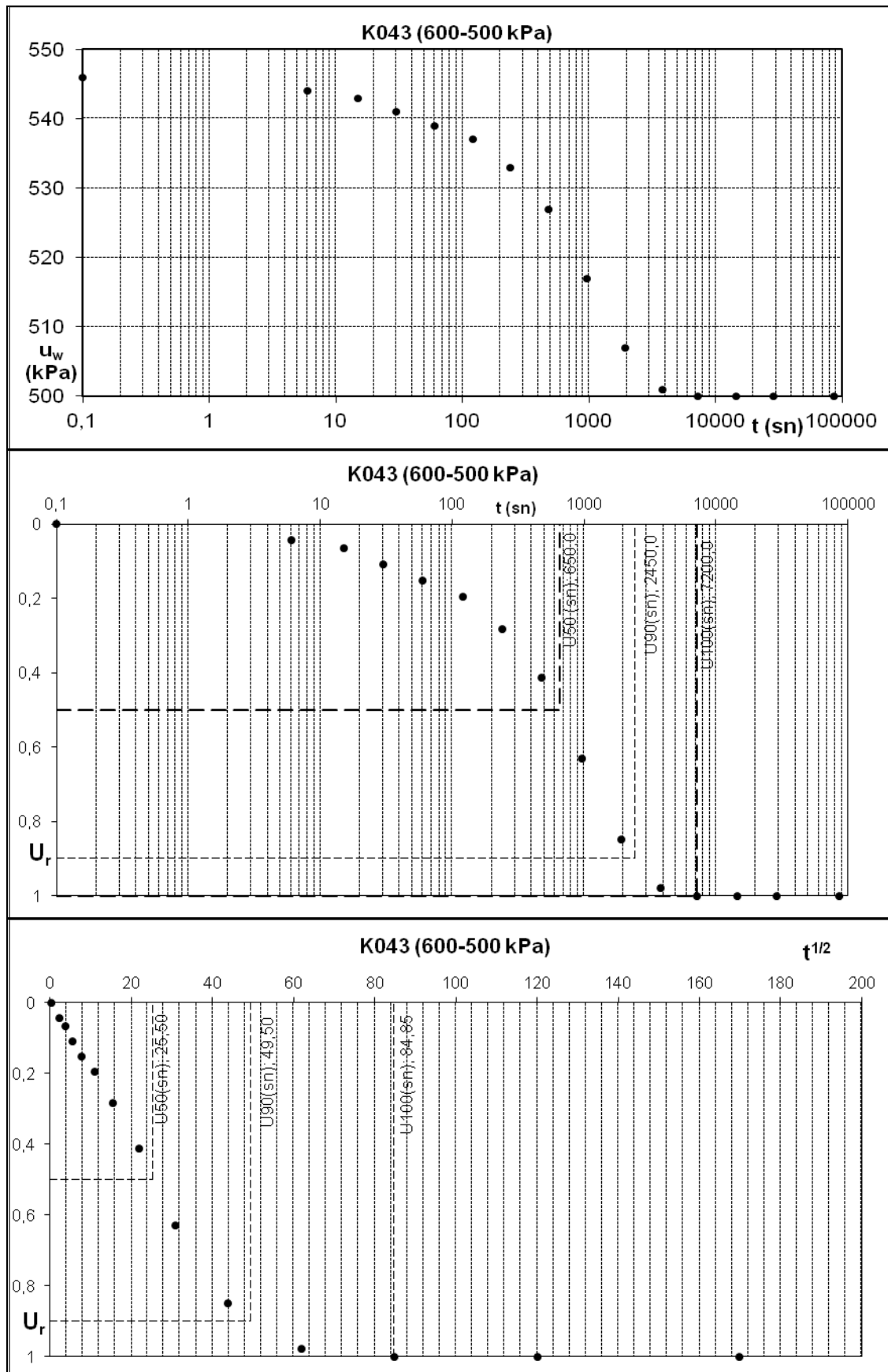
K040

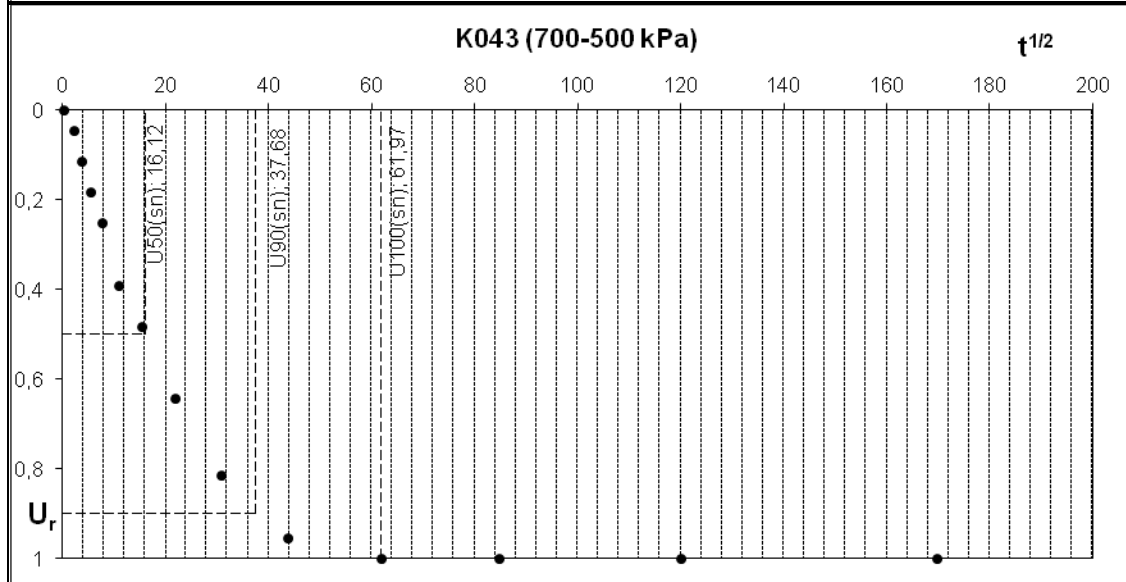
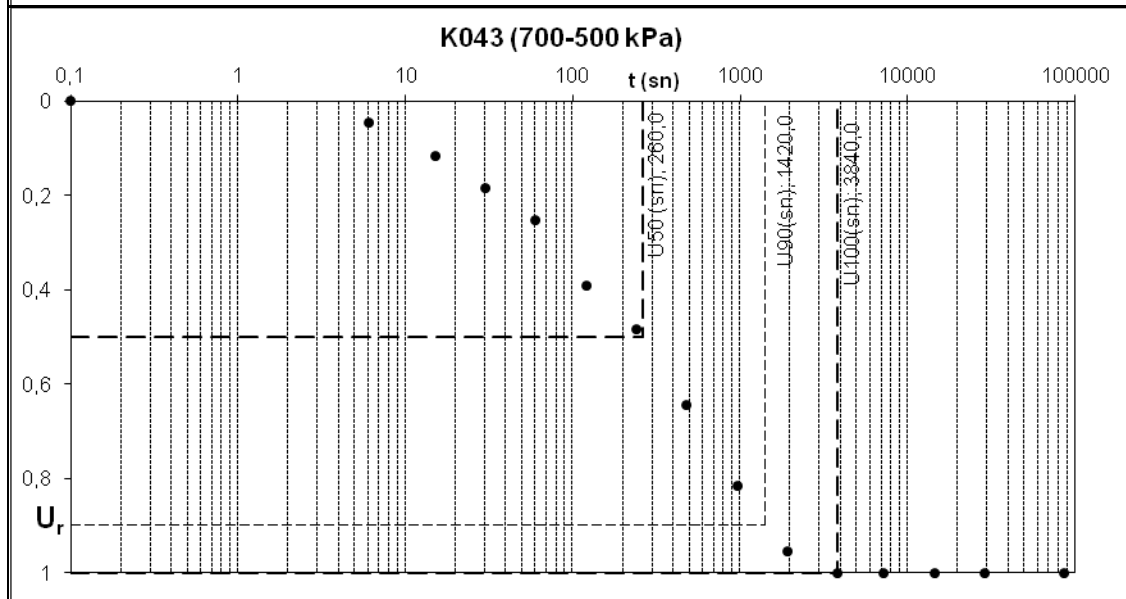
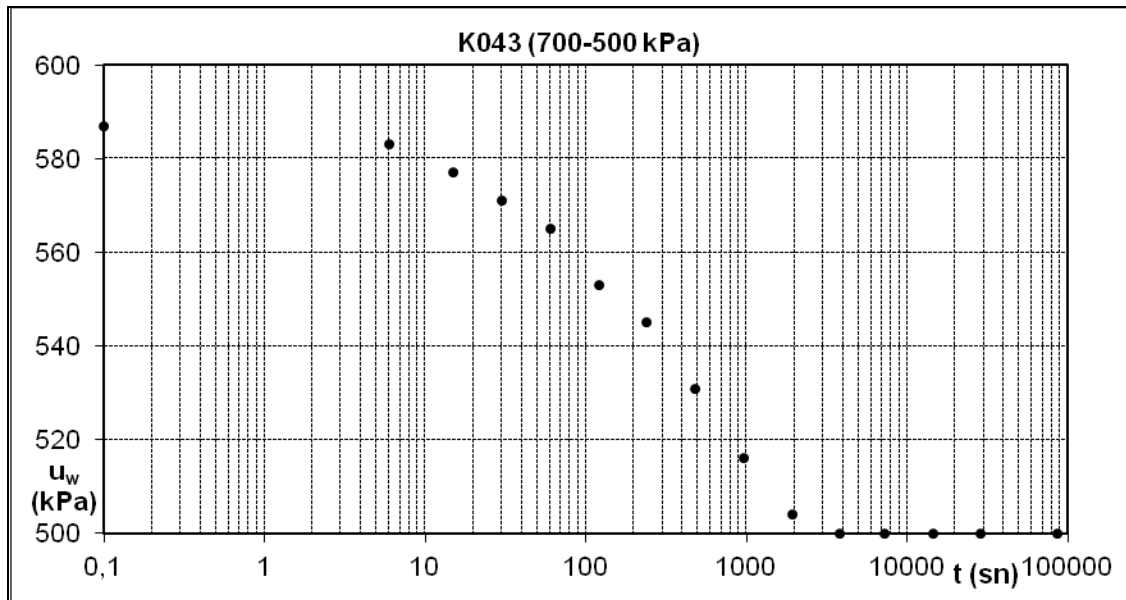


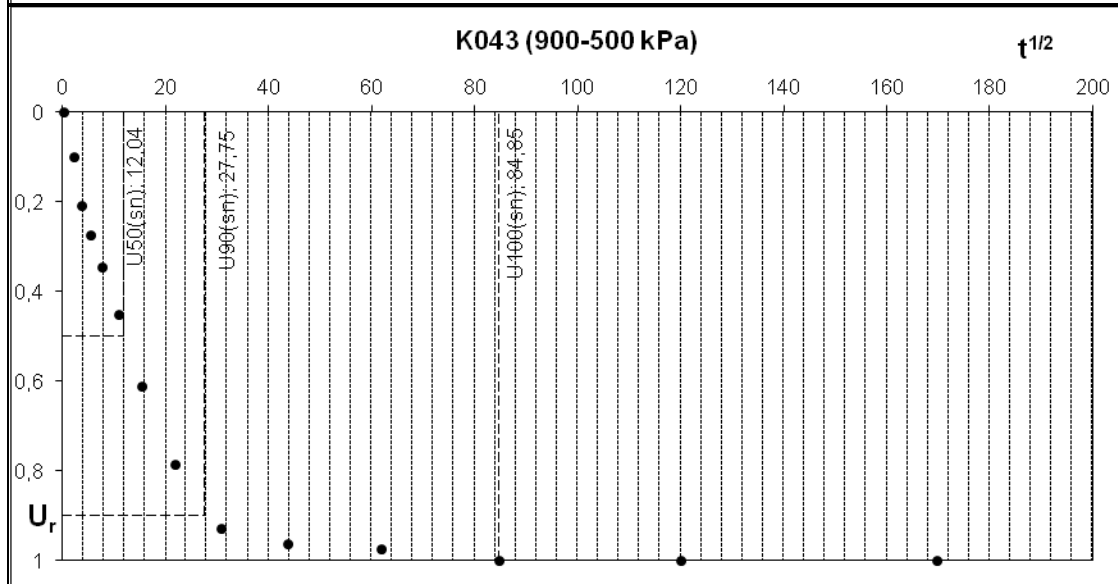
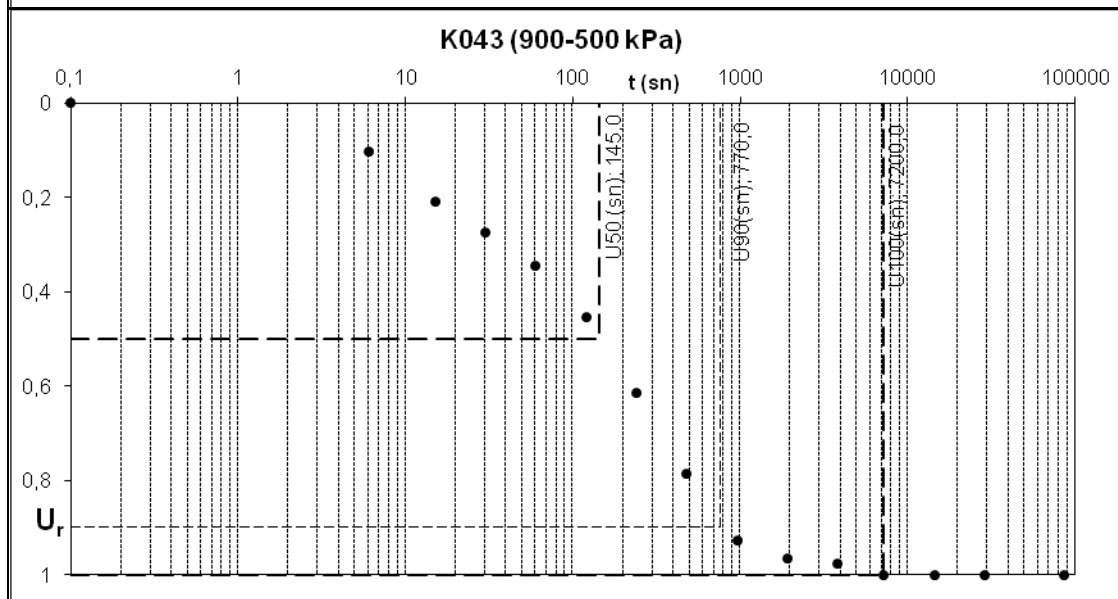
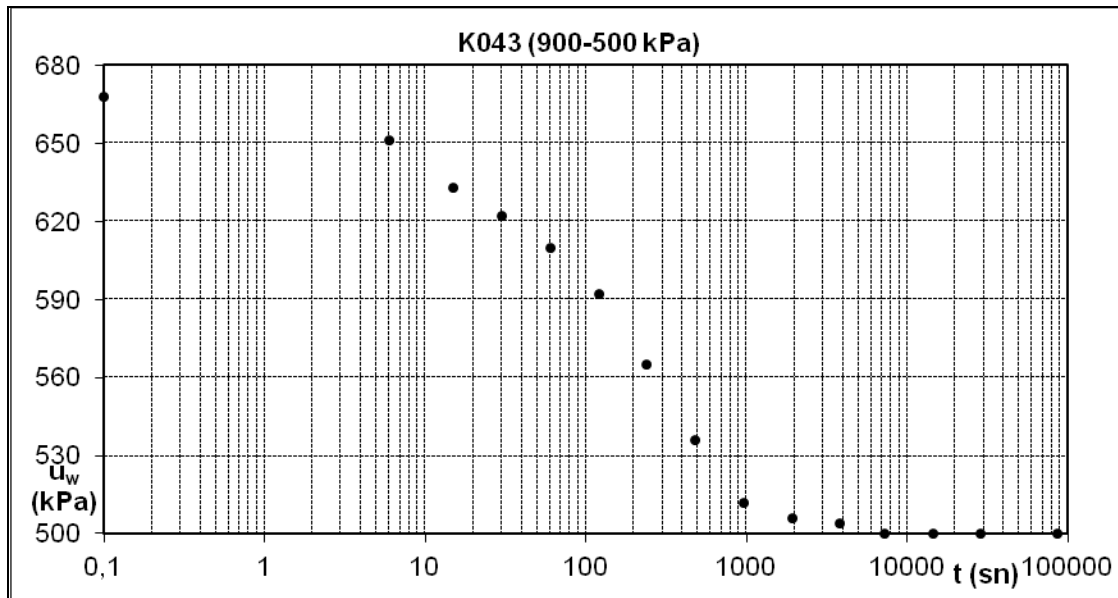




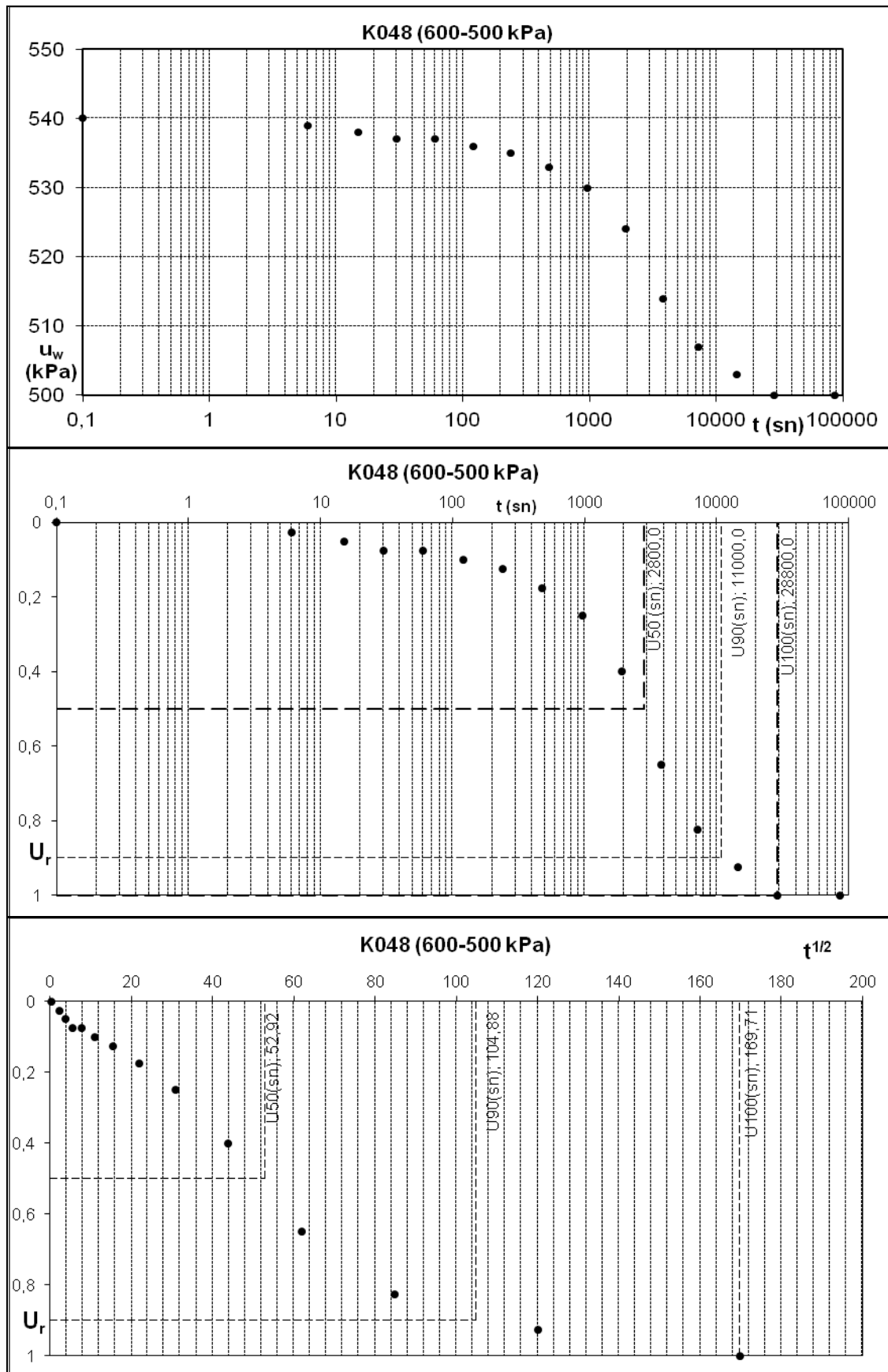
K043

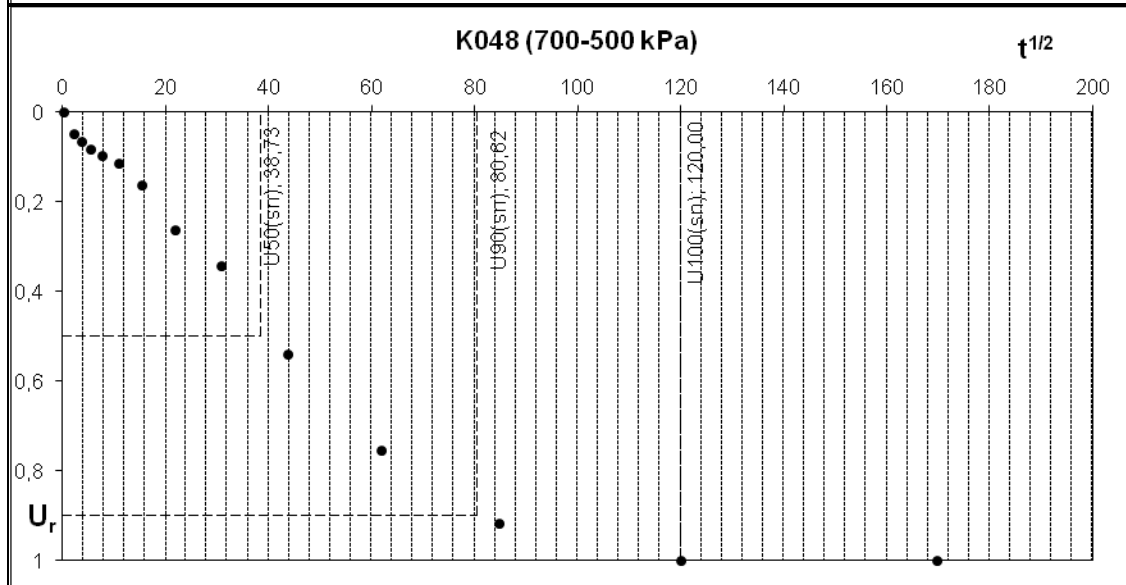
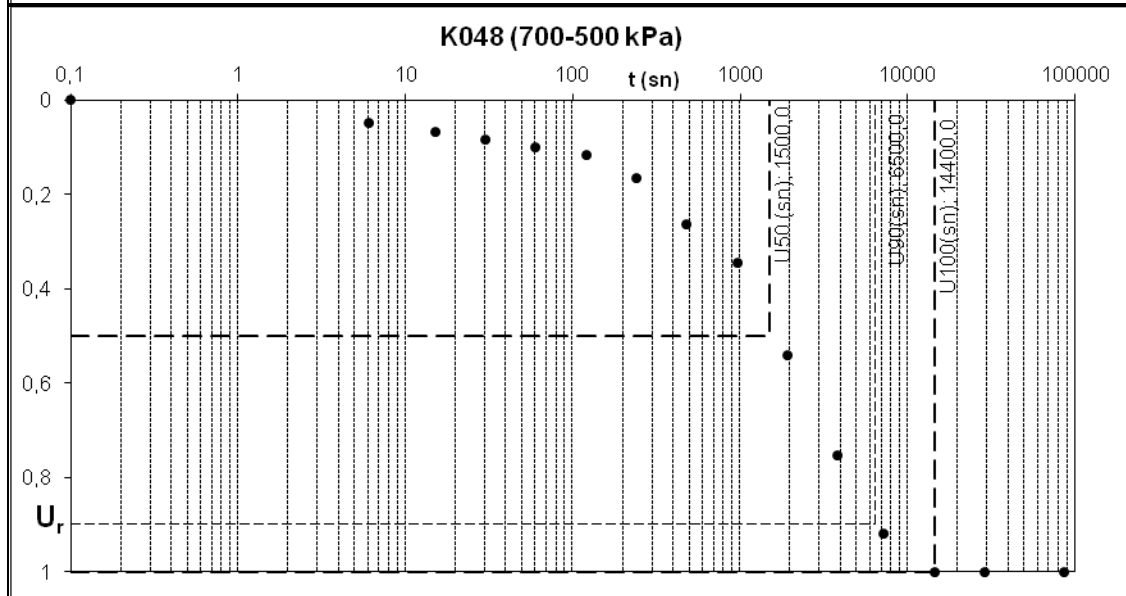
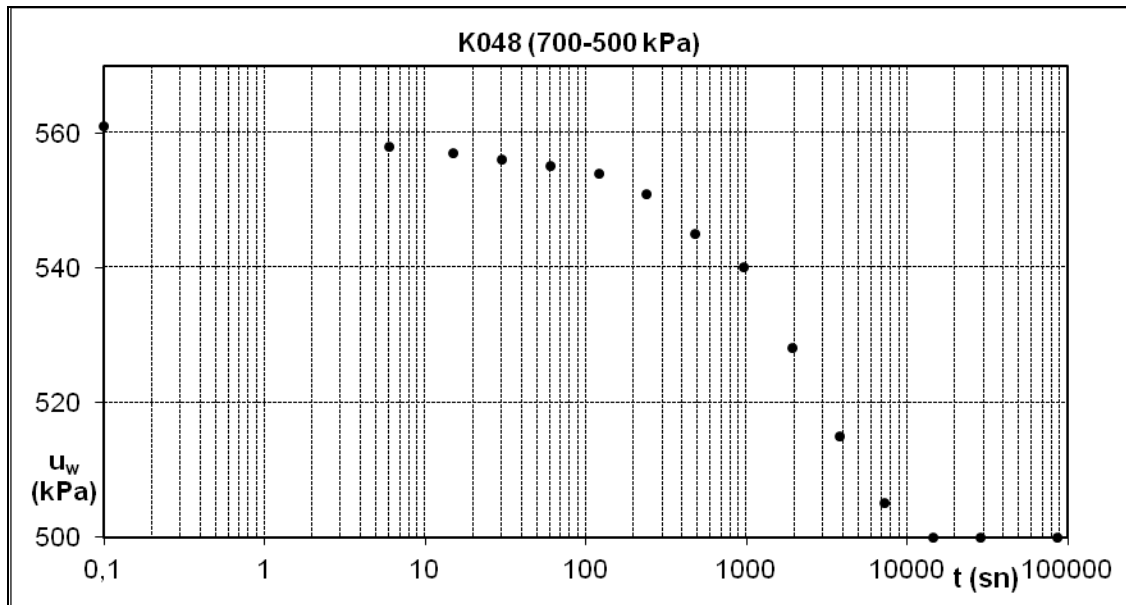


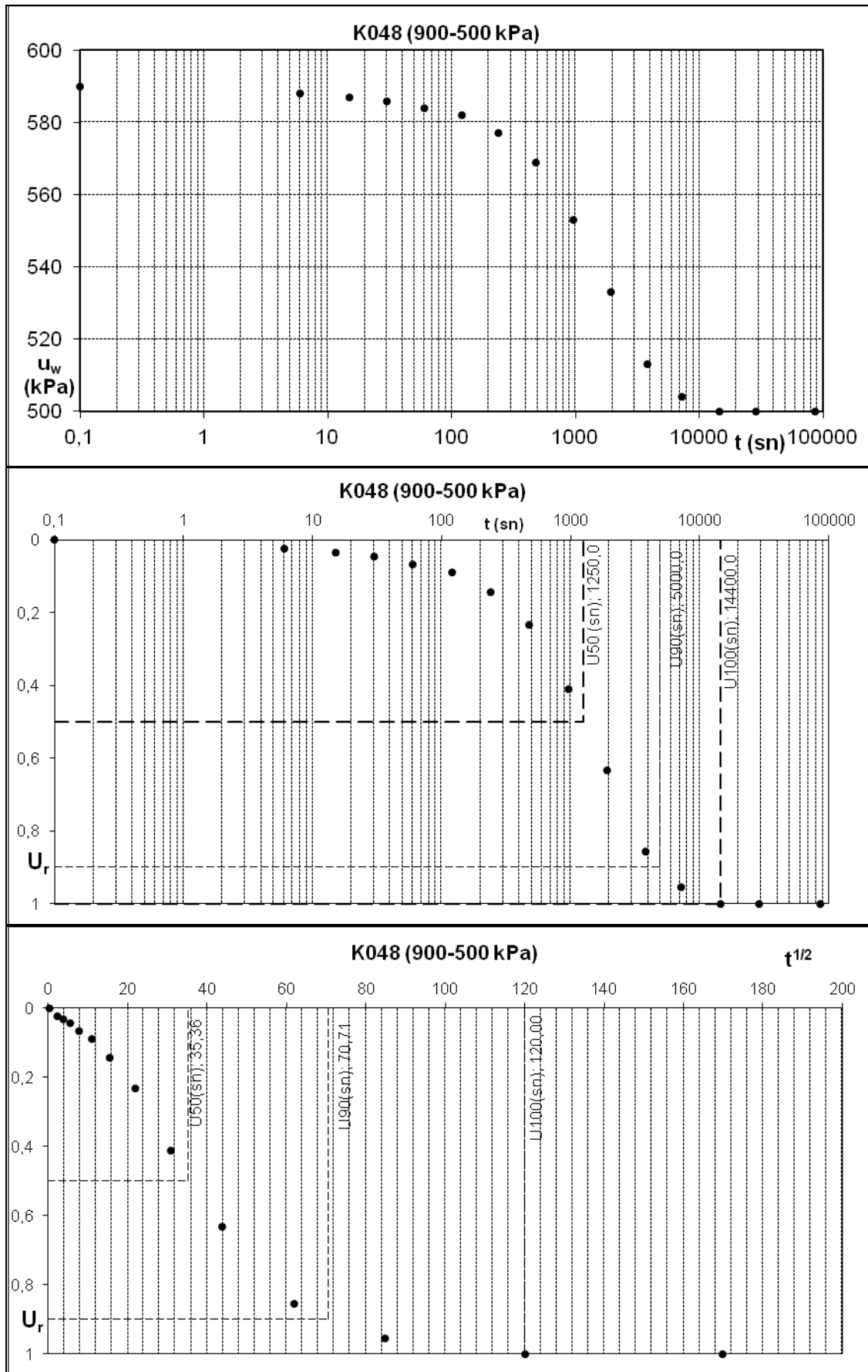




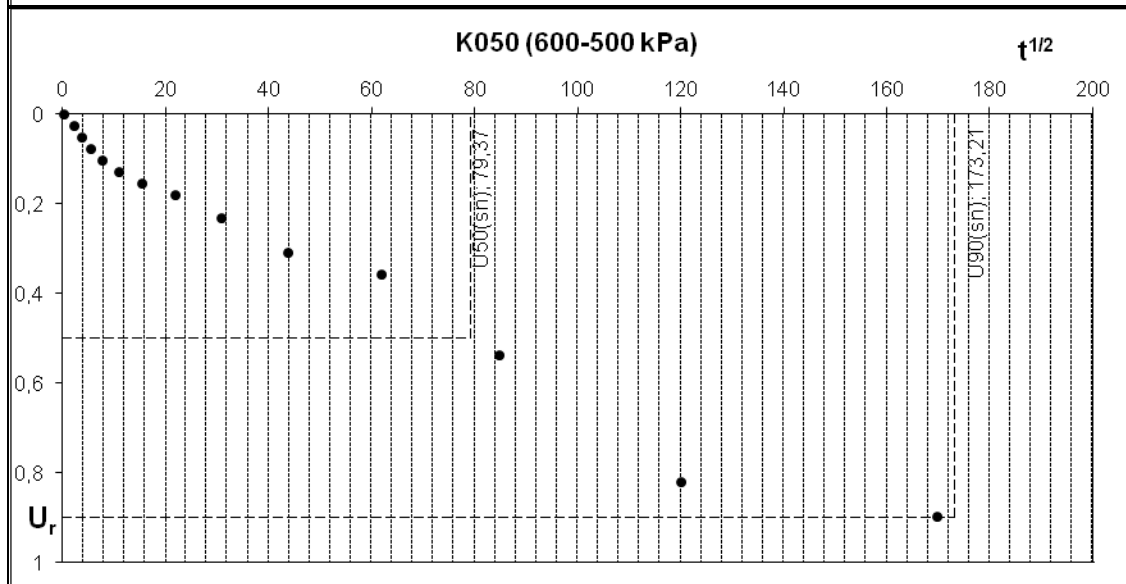
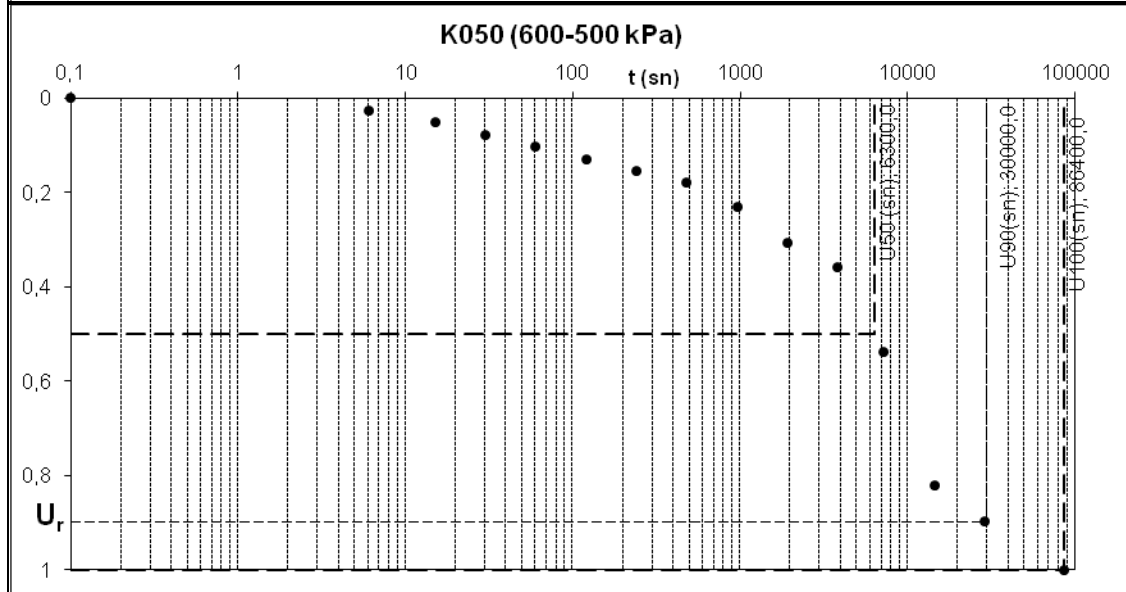
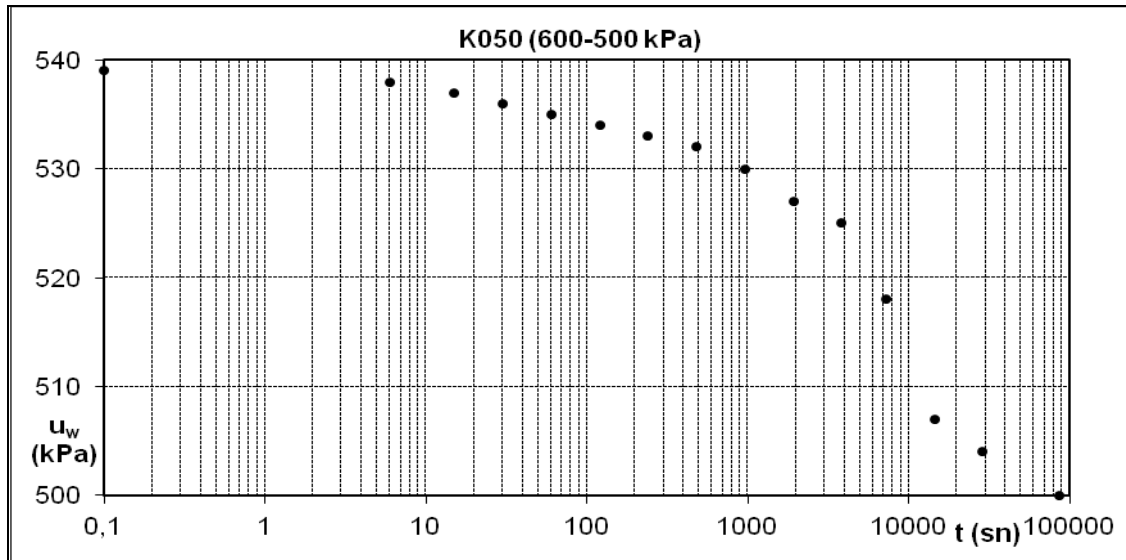
K048

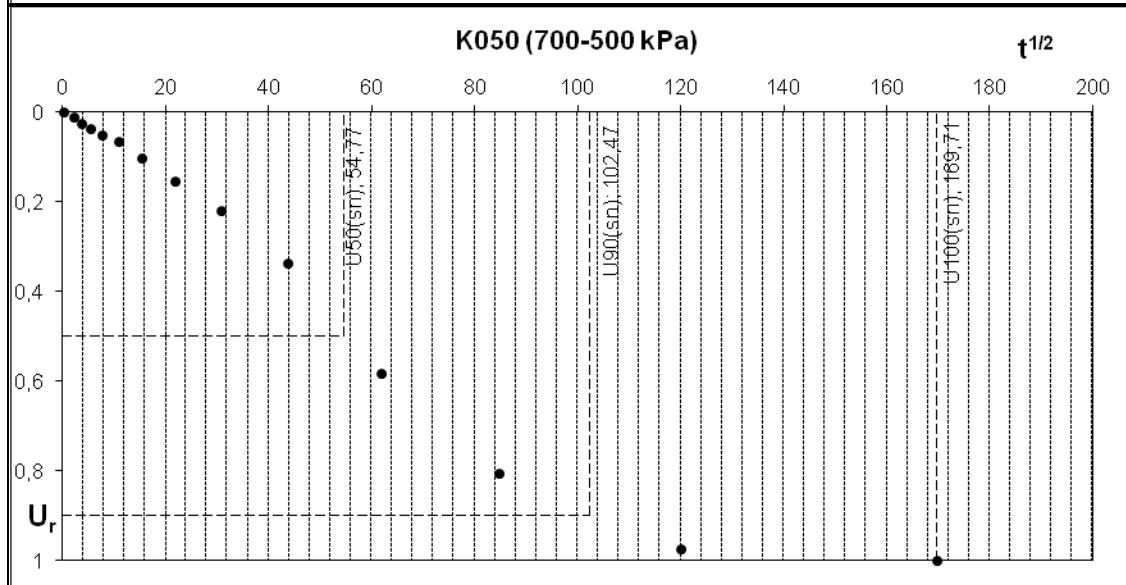
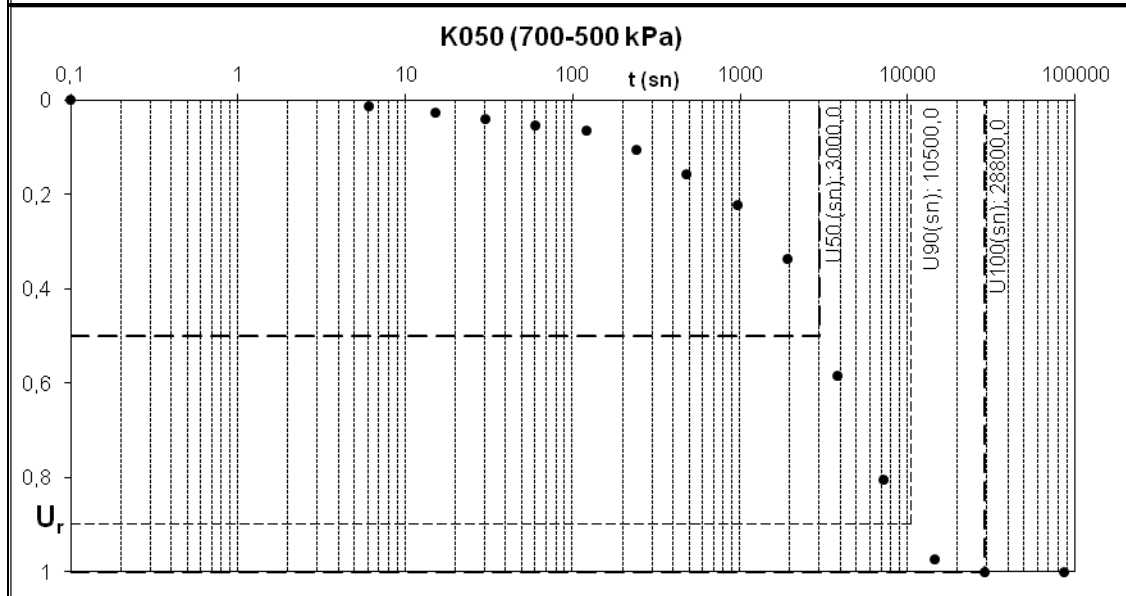
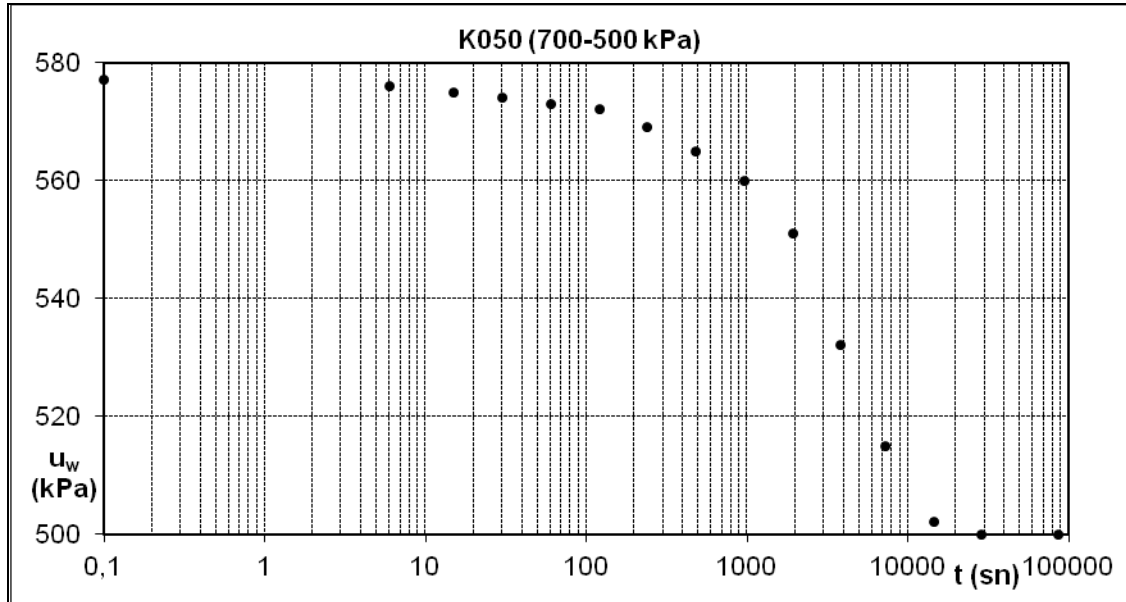




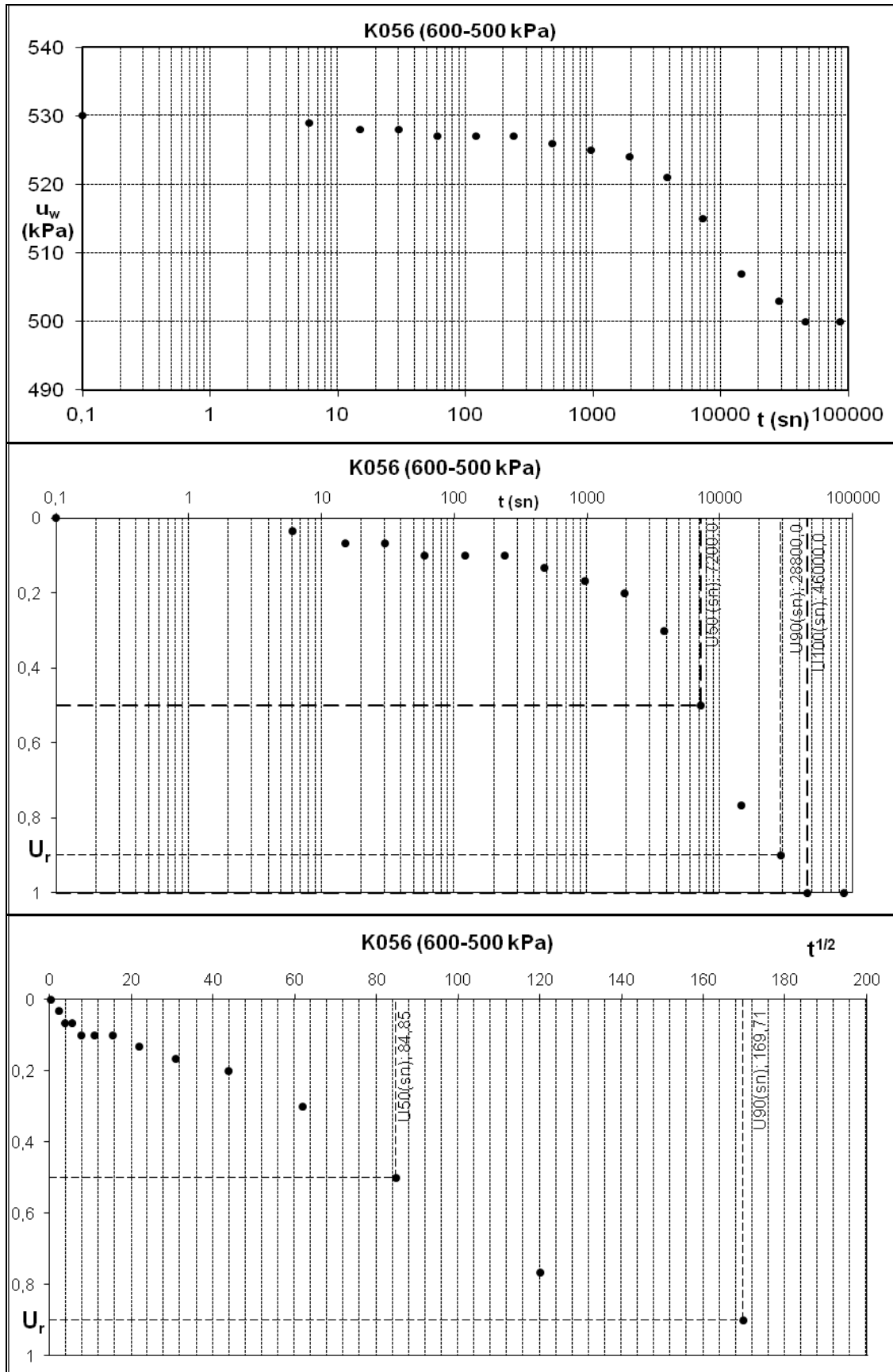


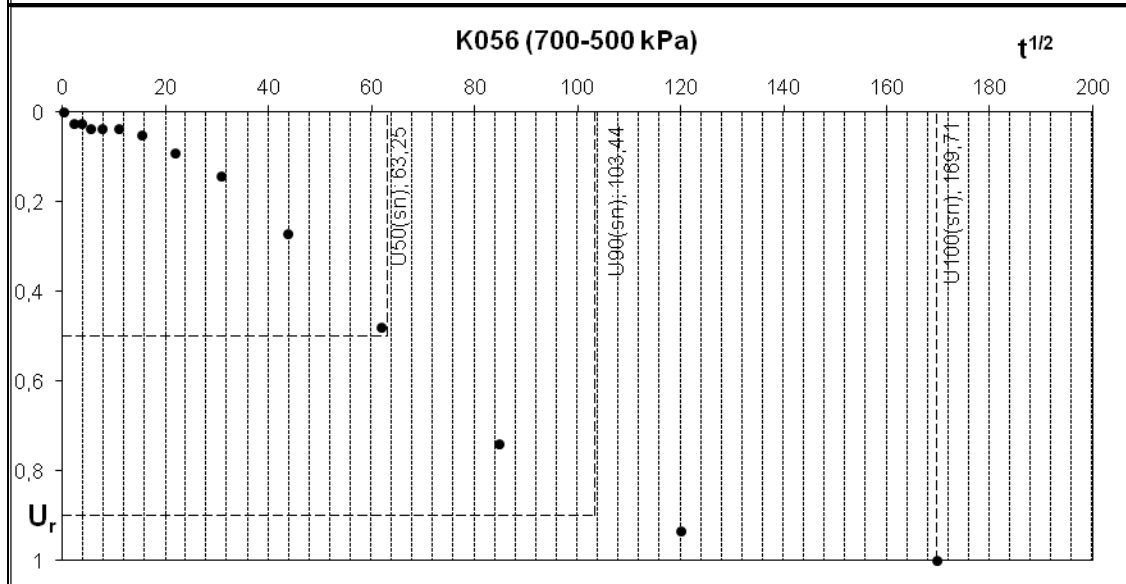
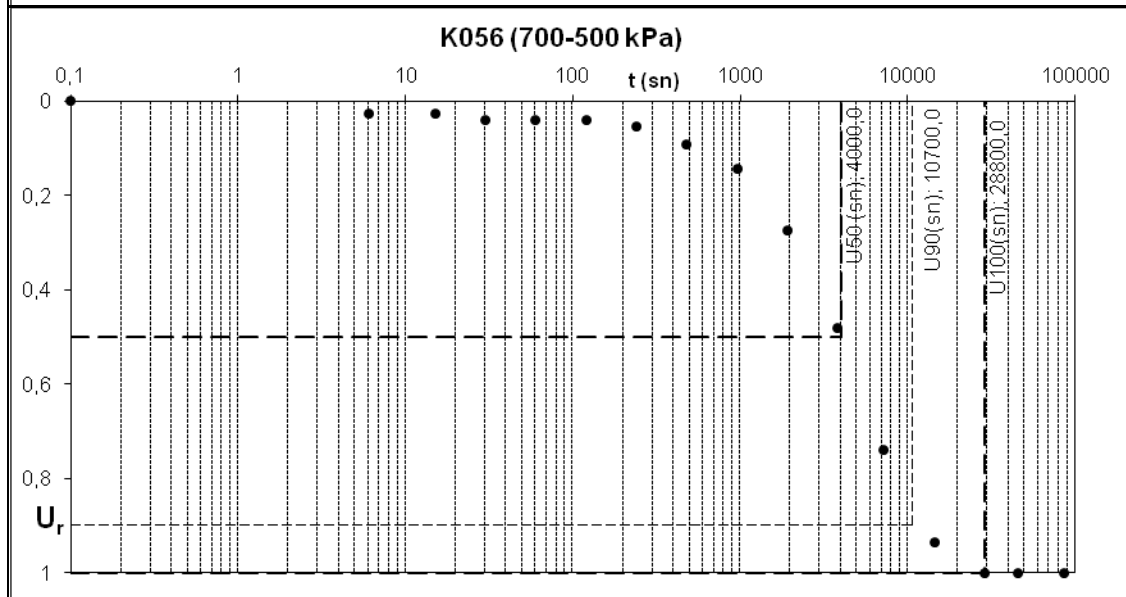
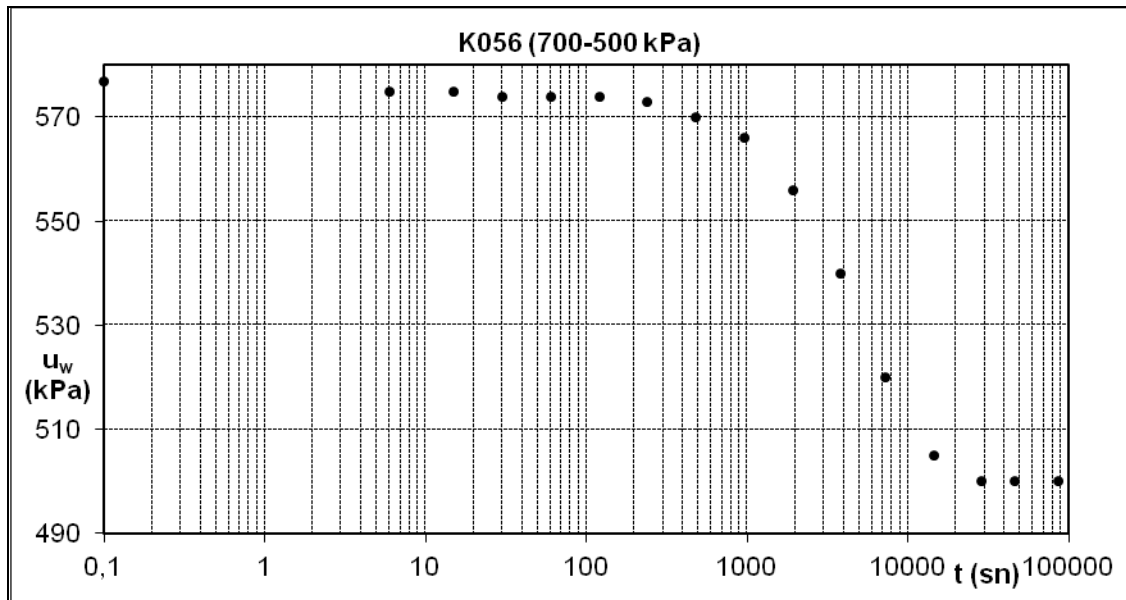
K050

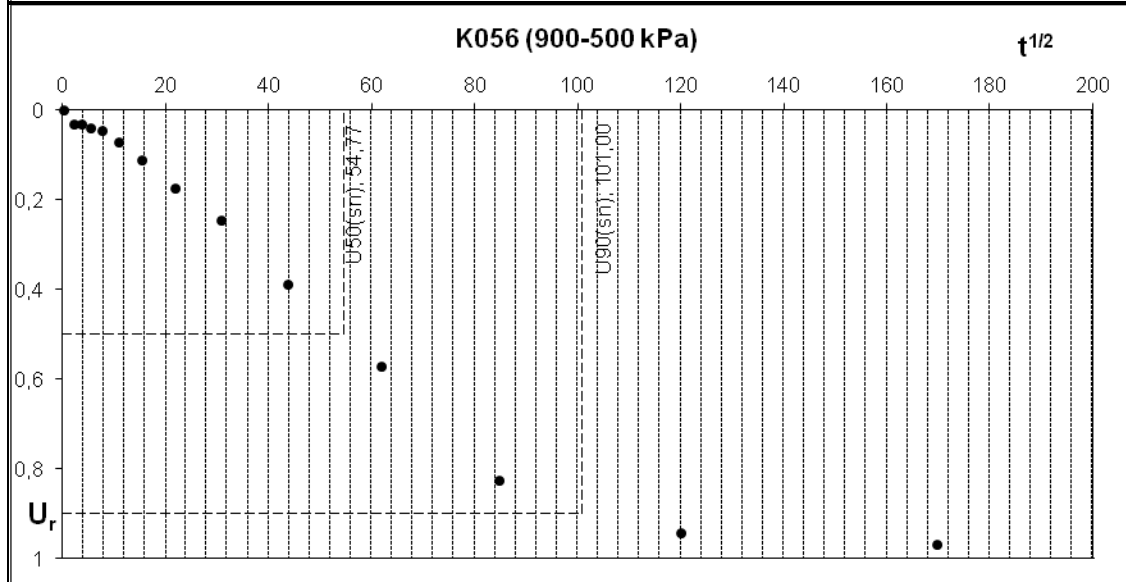
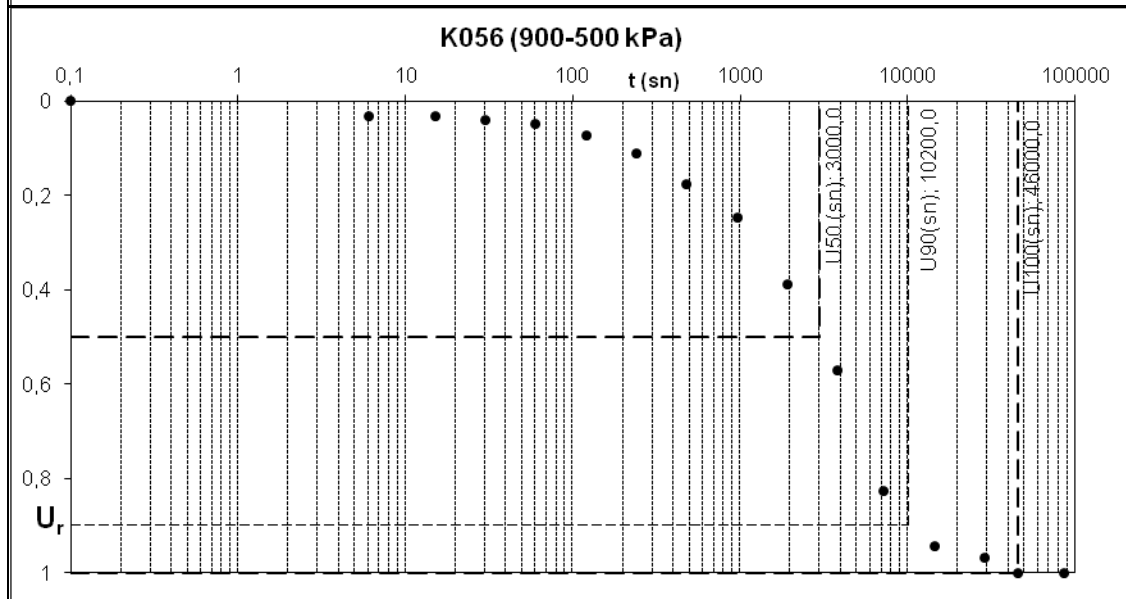
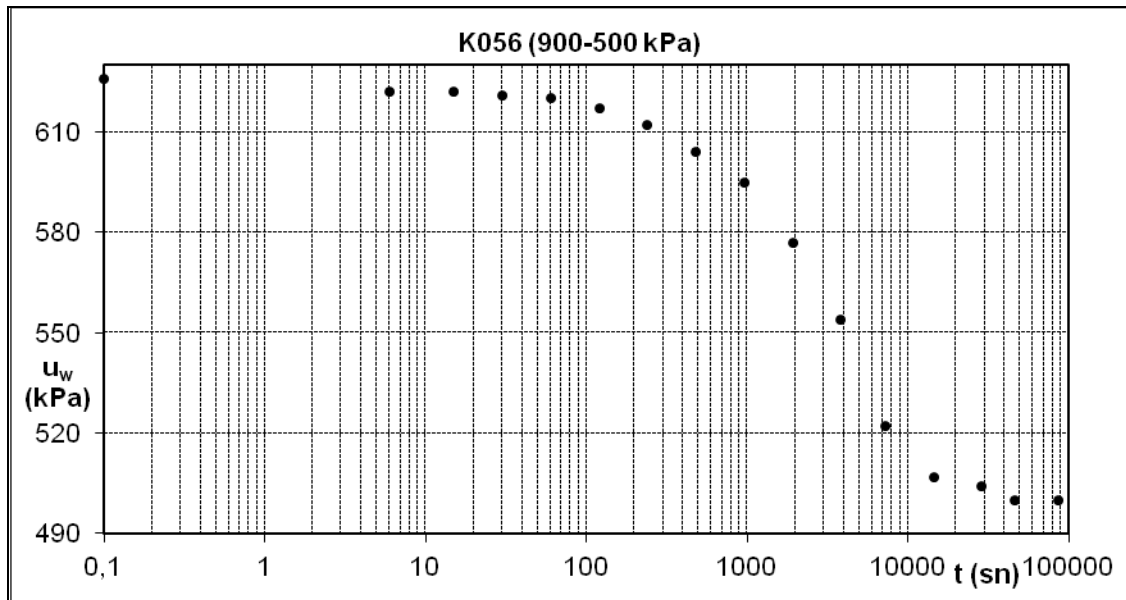




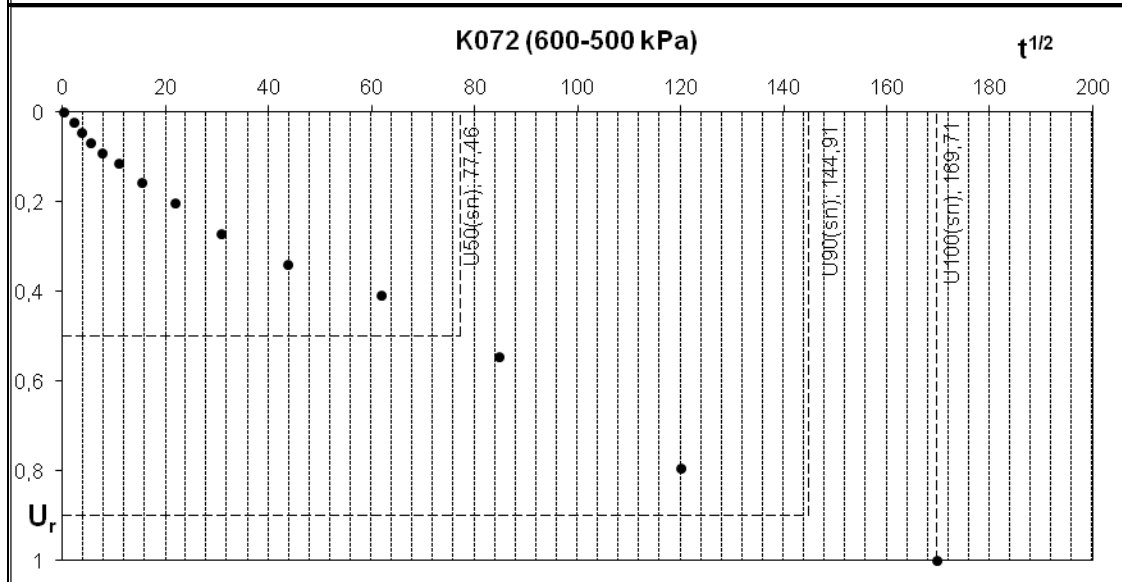
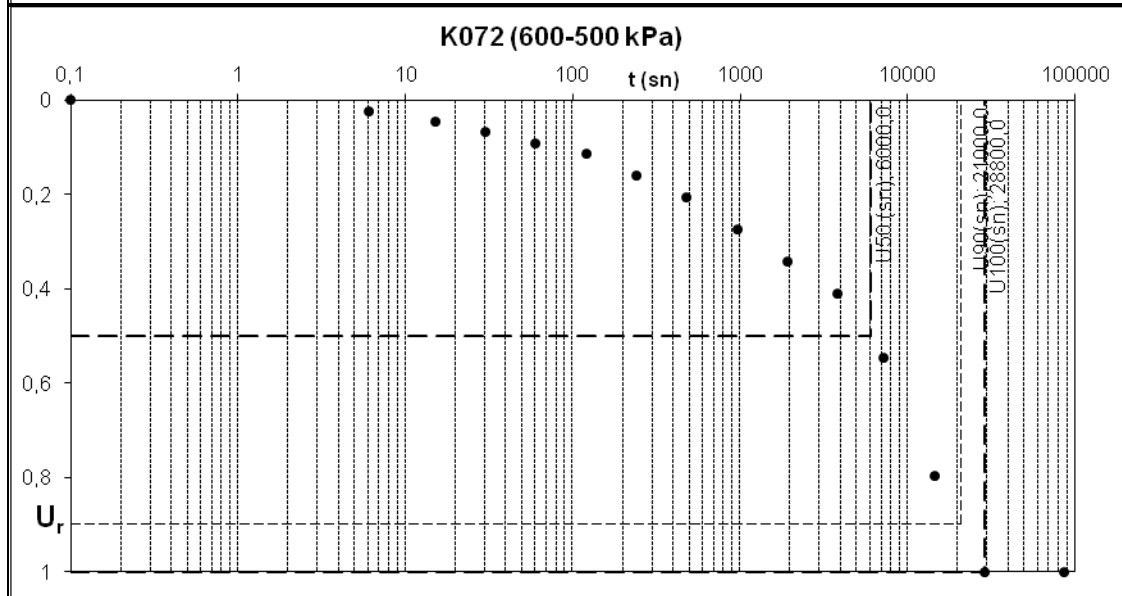
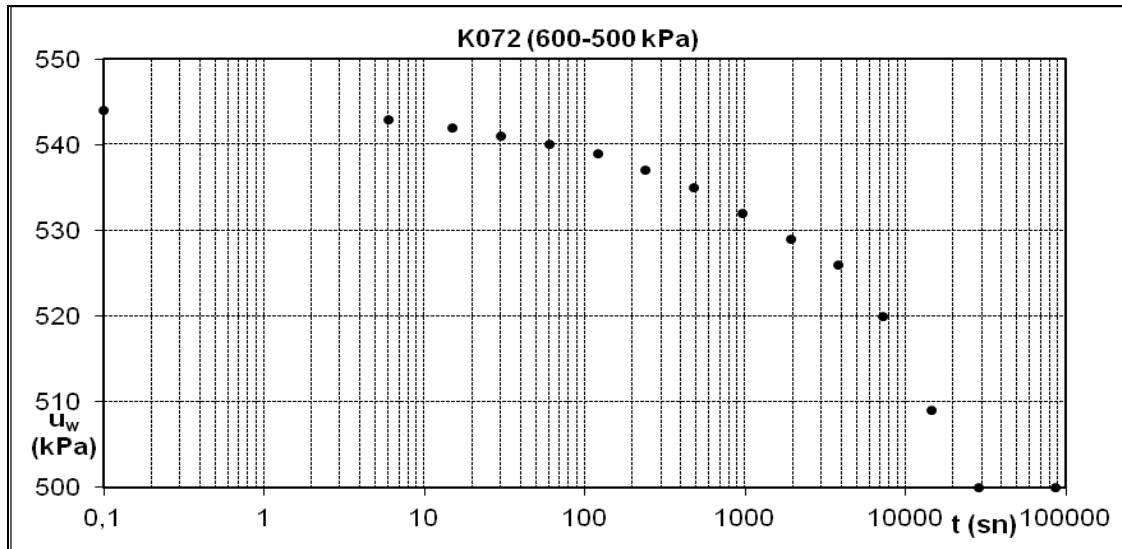
K056

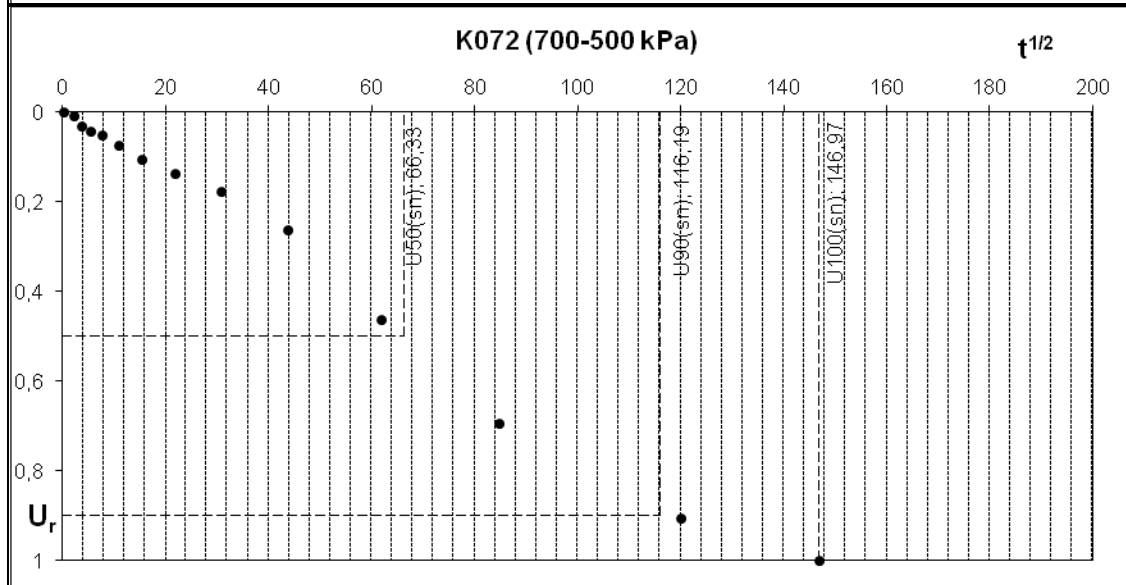
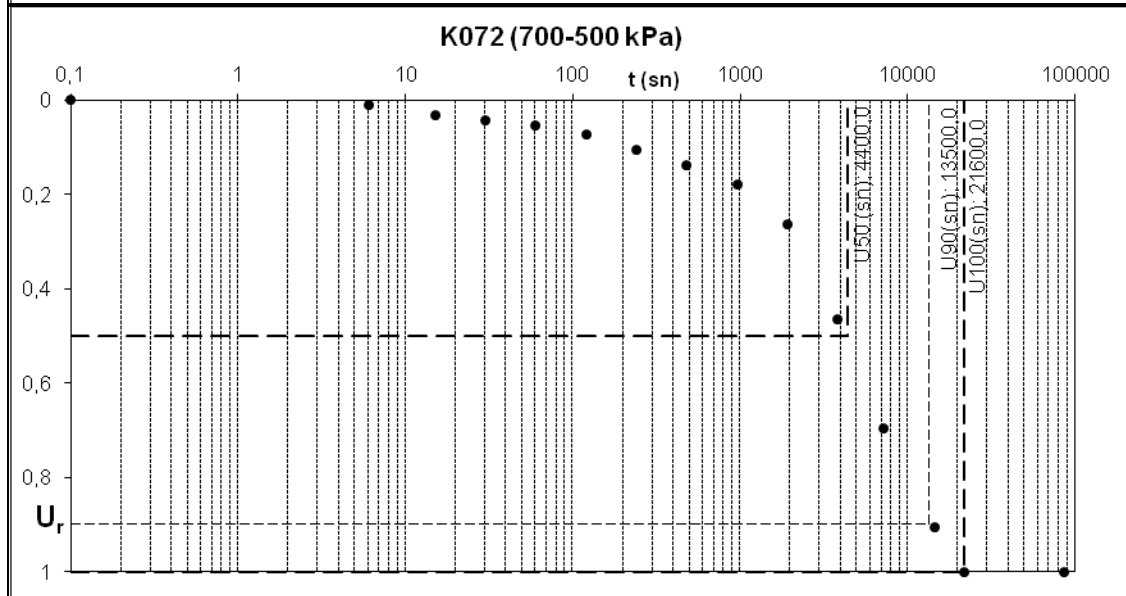
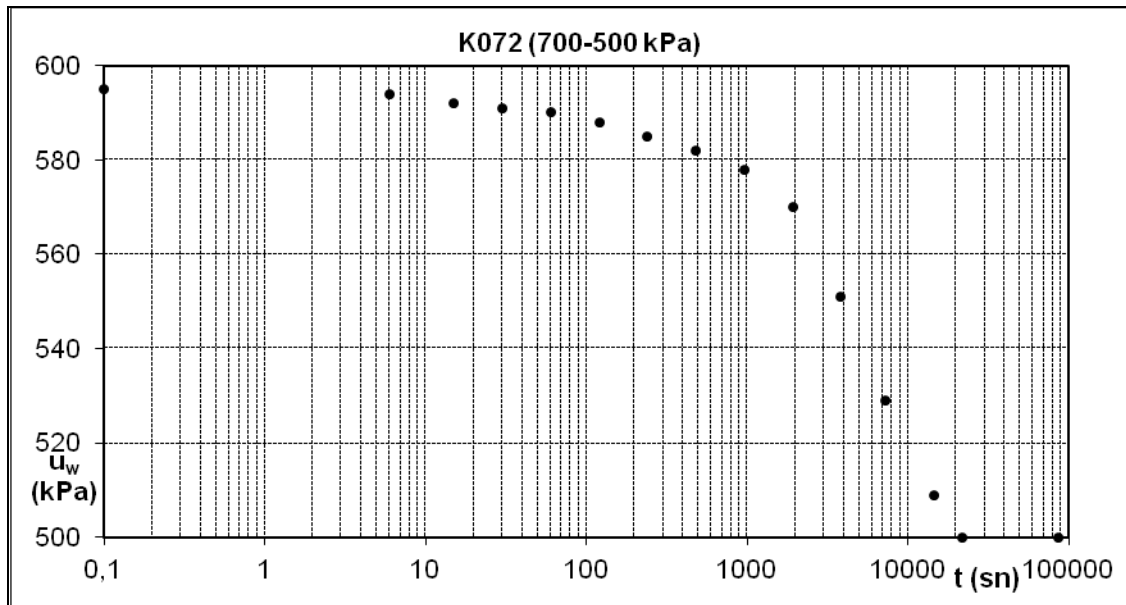


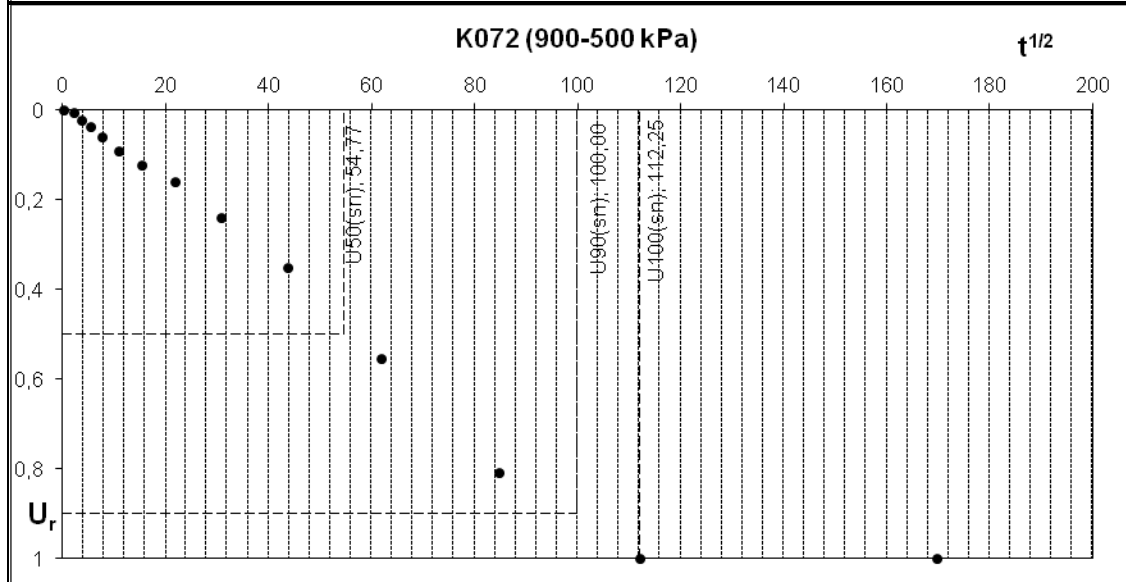
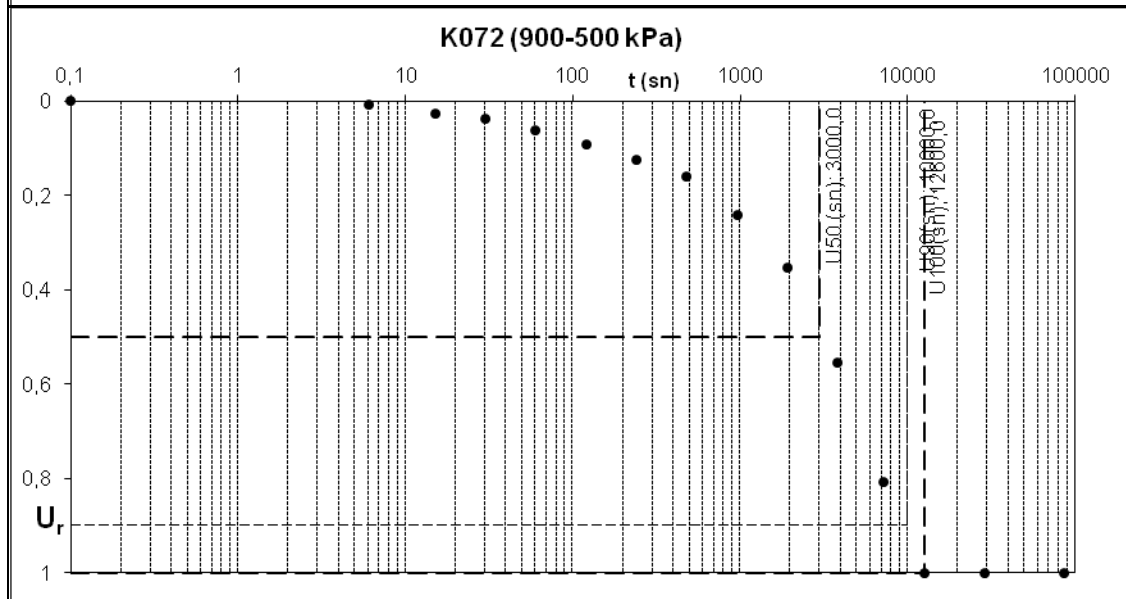
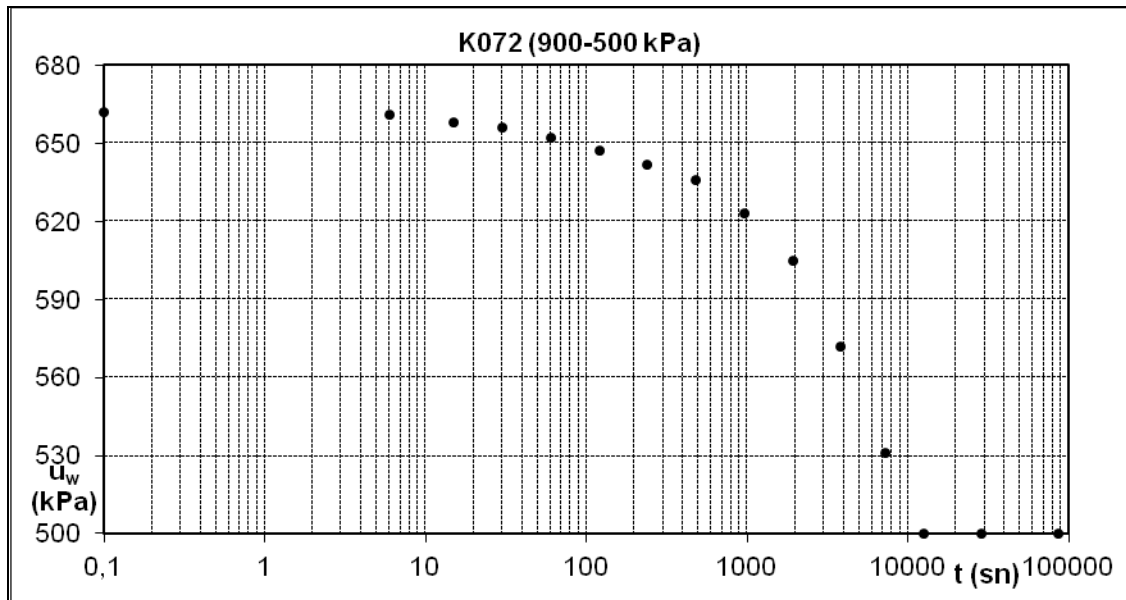




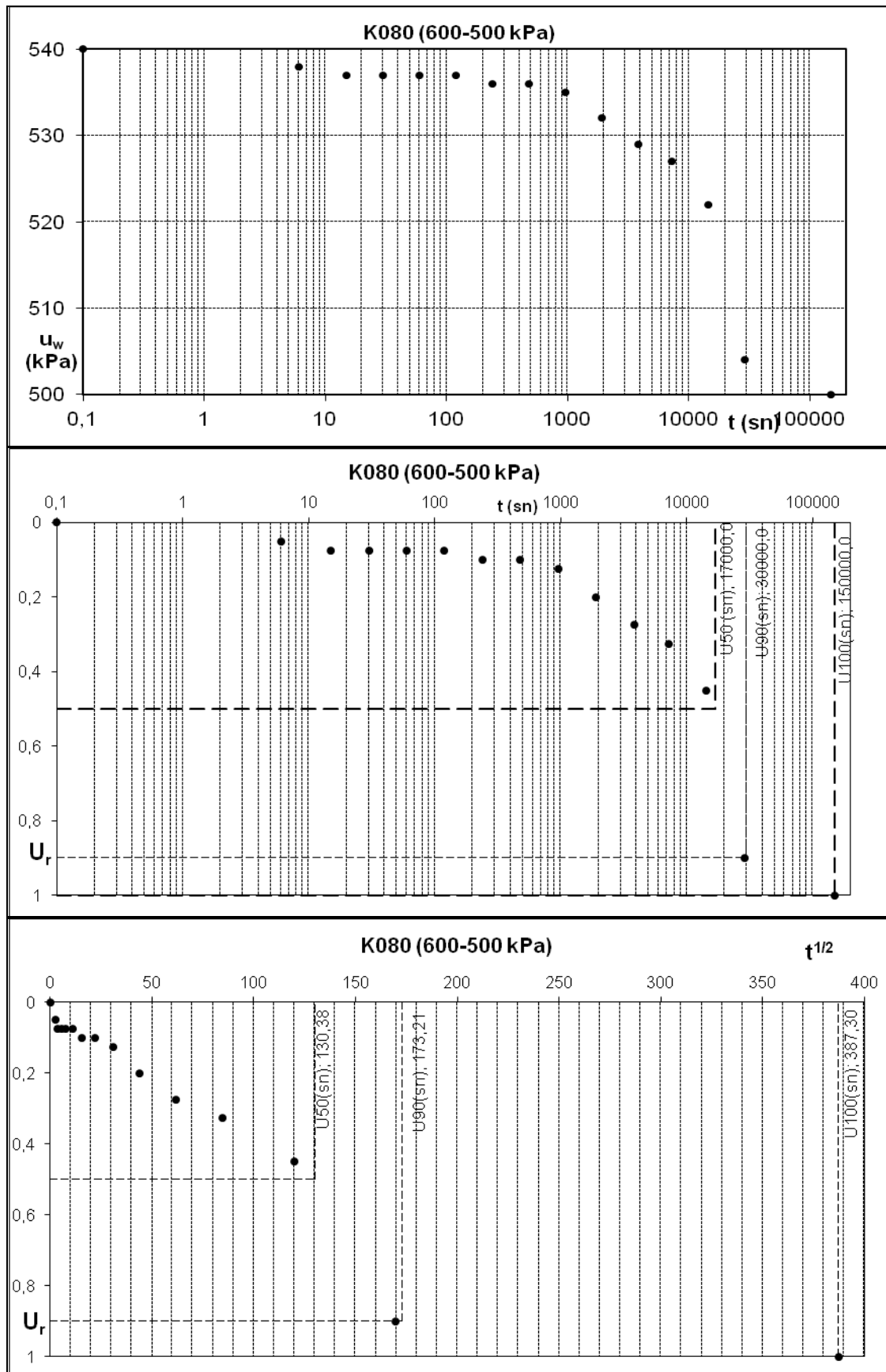
K072

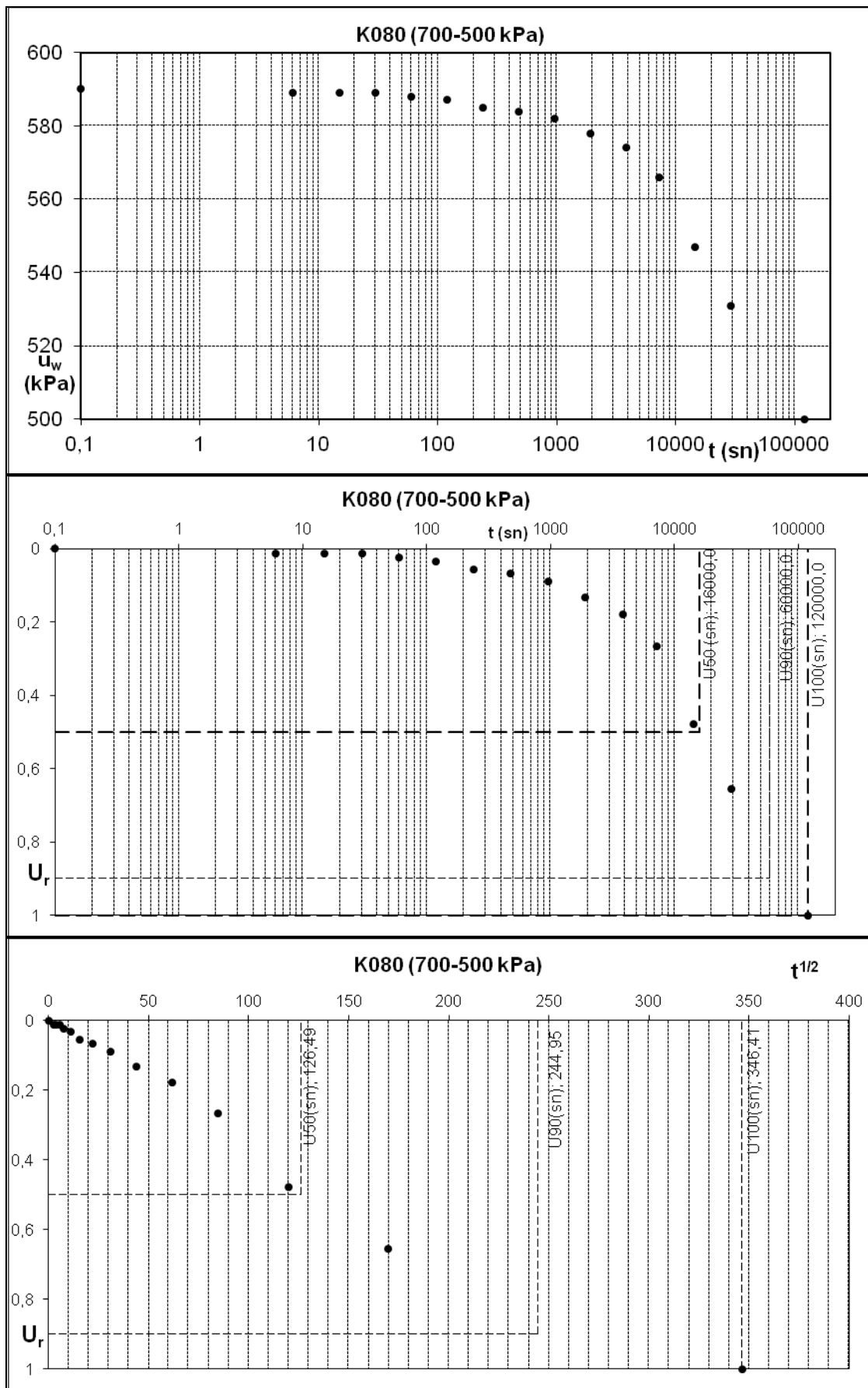


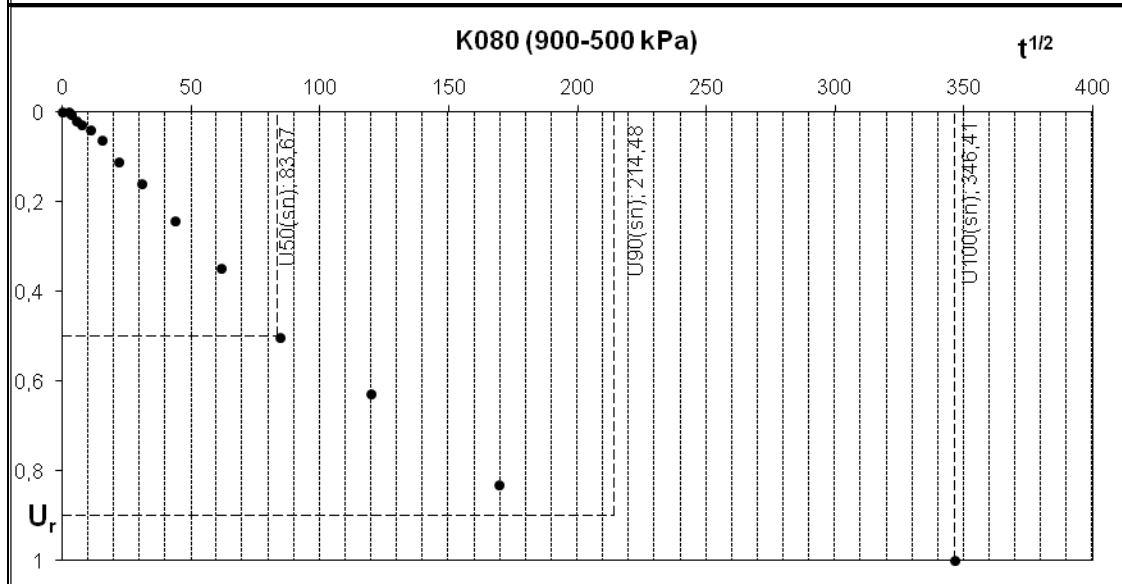
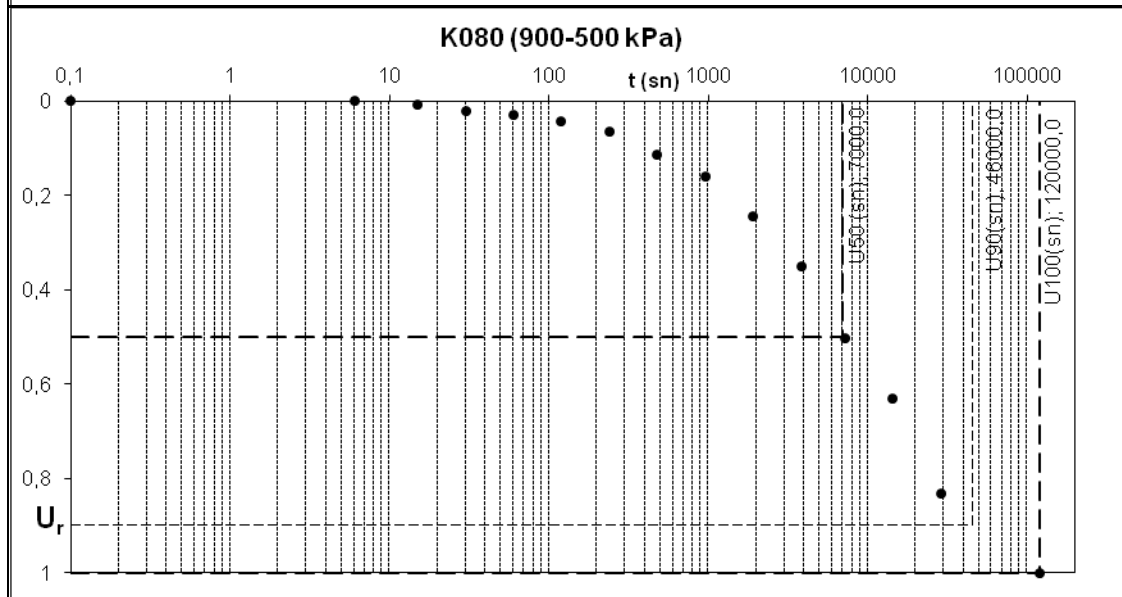
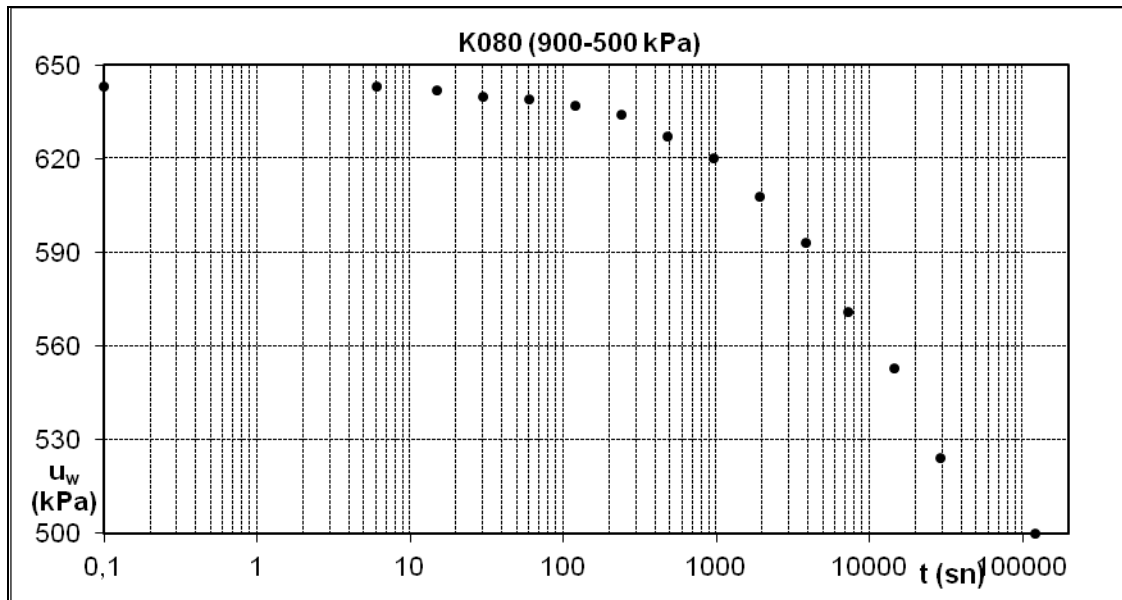




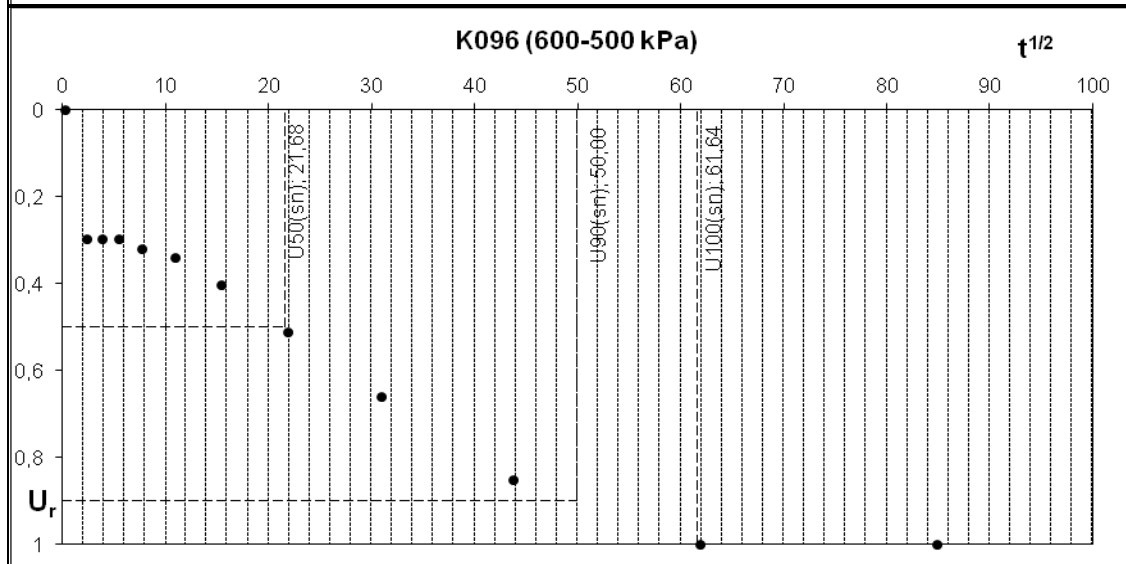
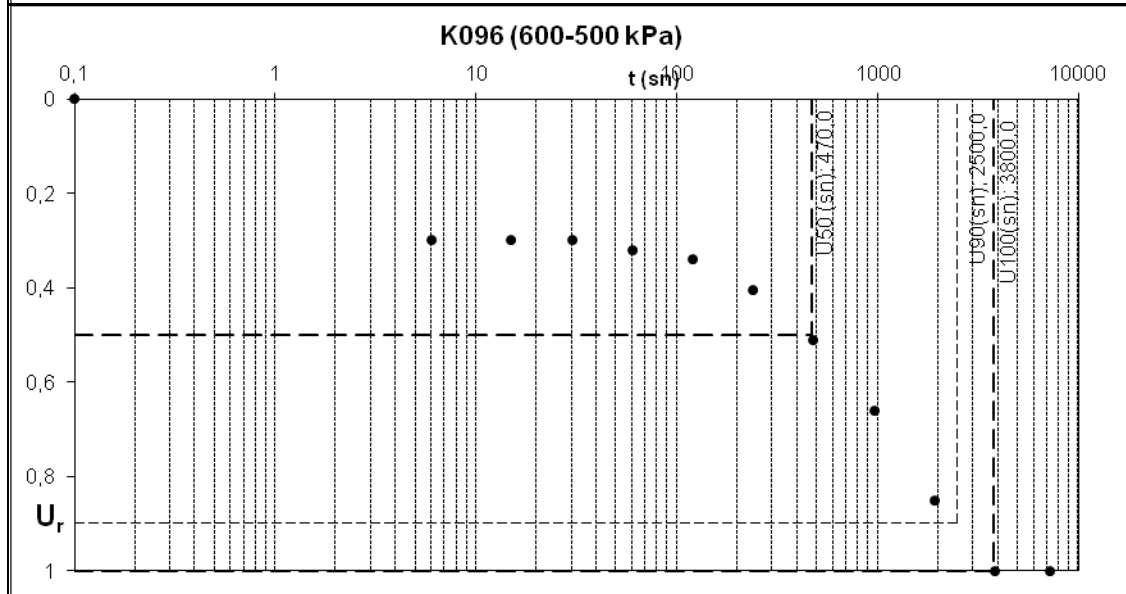
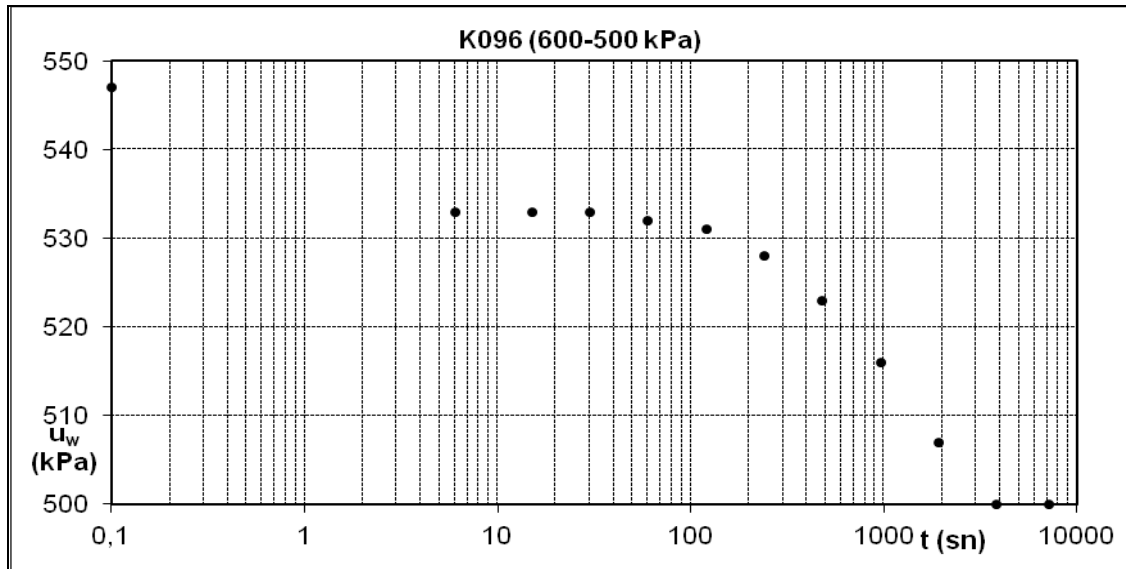
K080

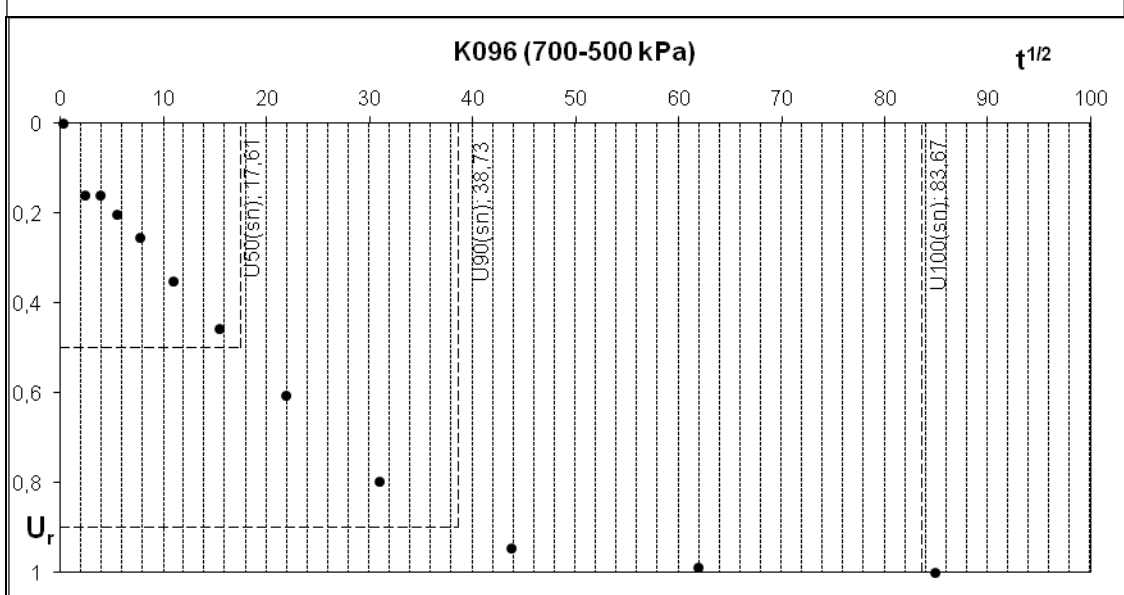
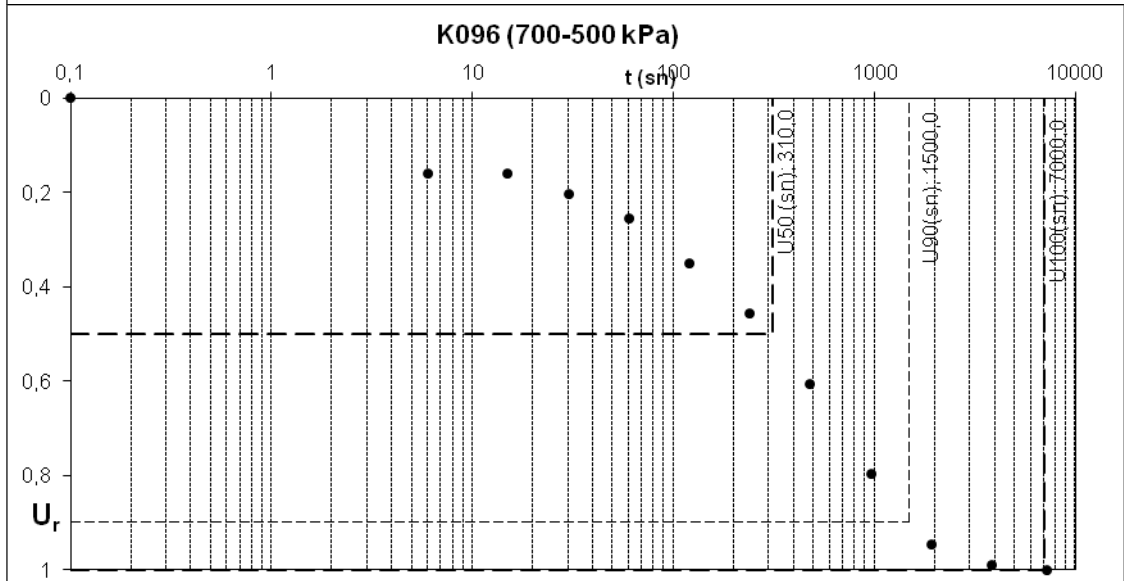
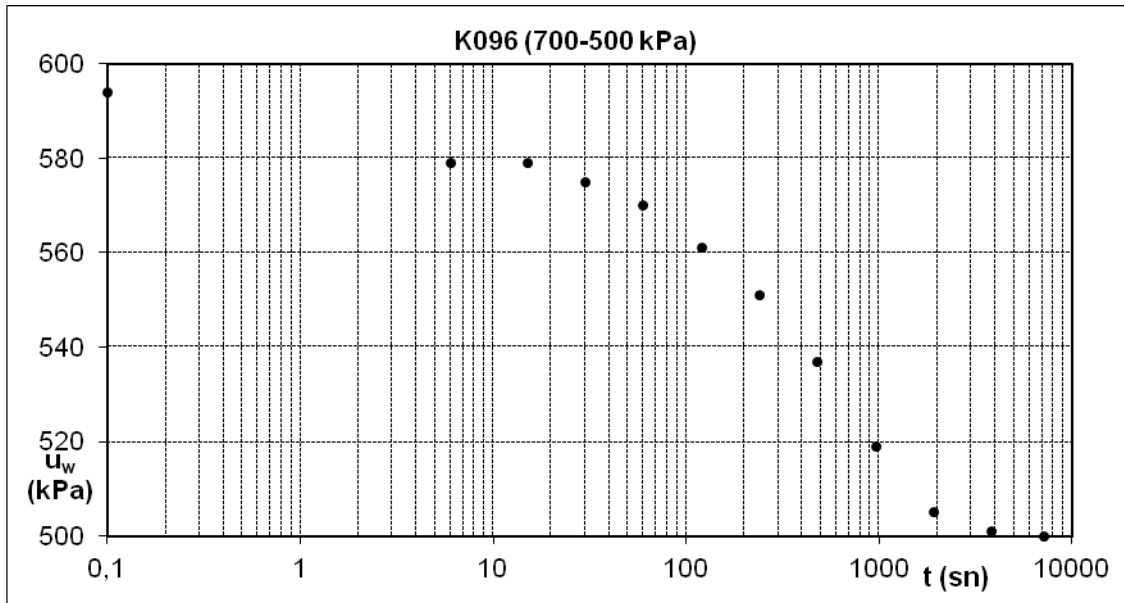


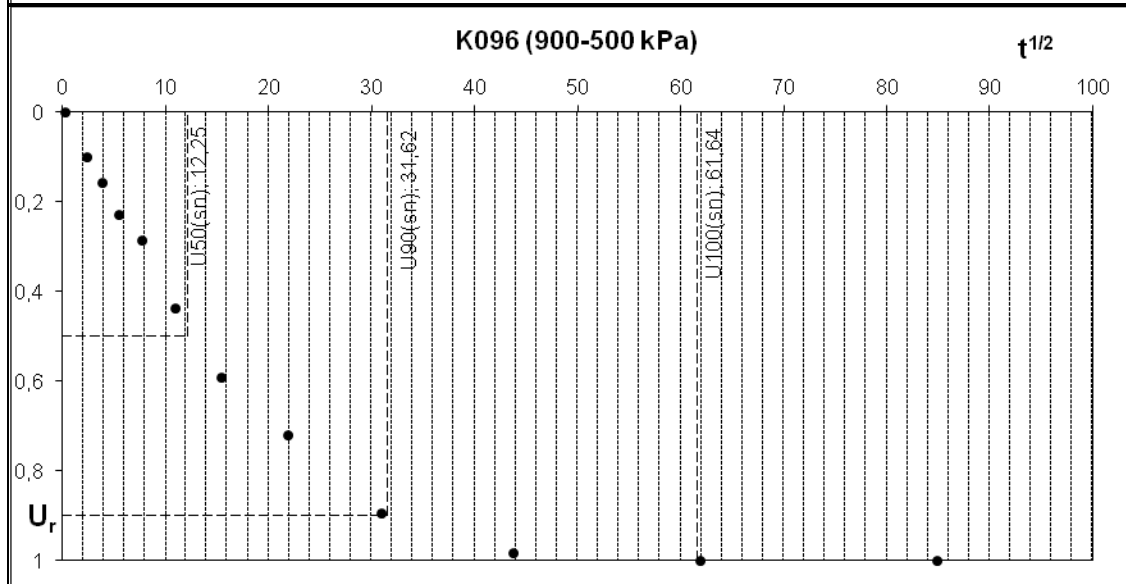
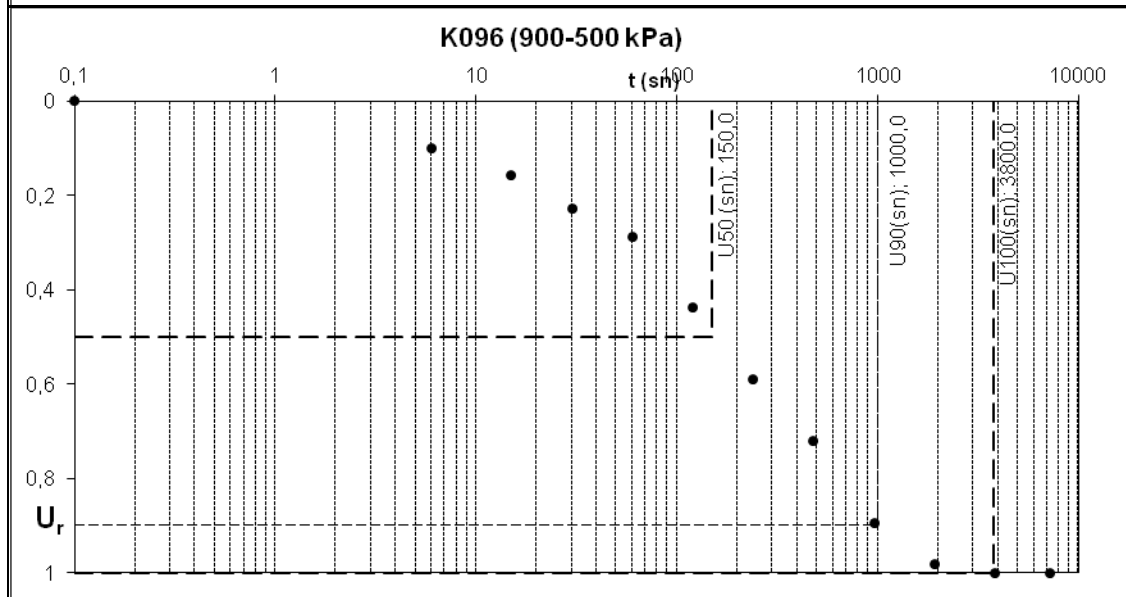
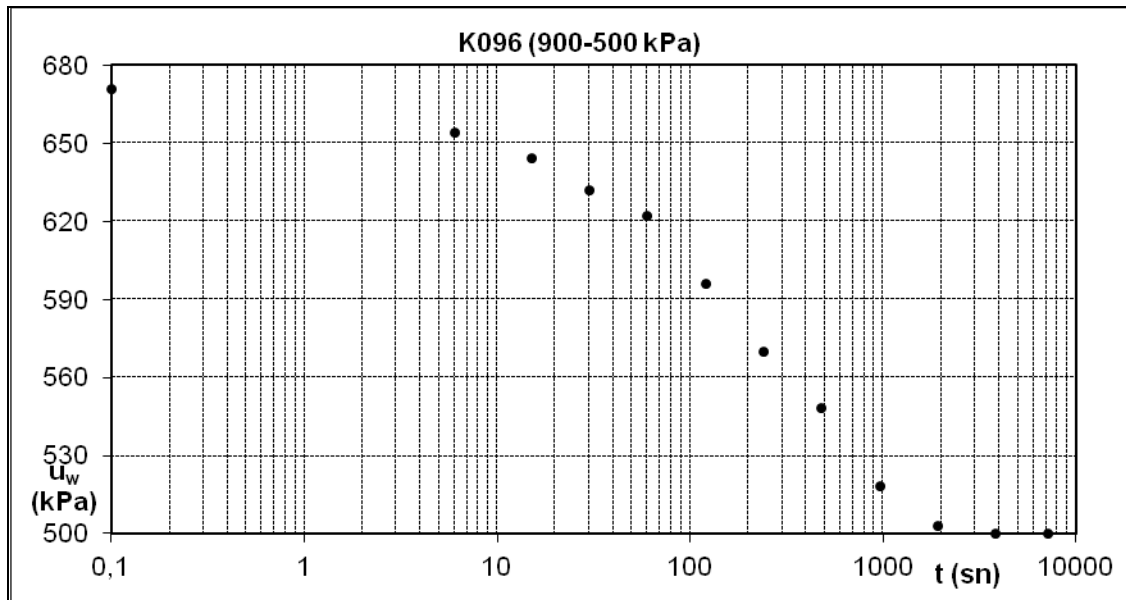




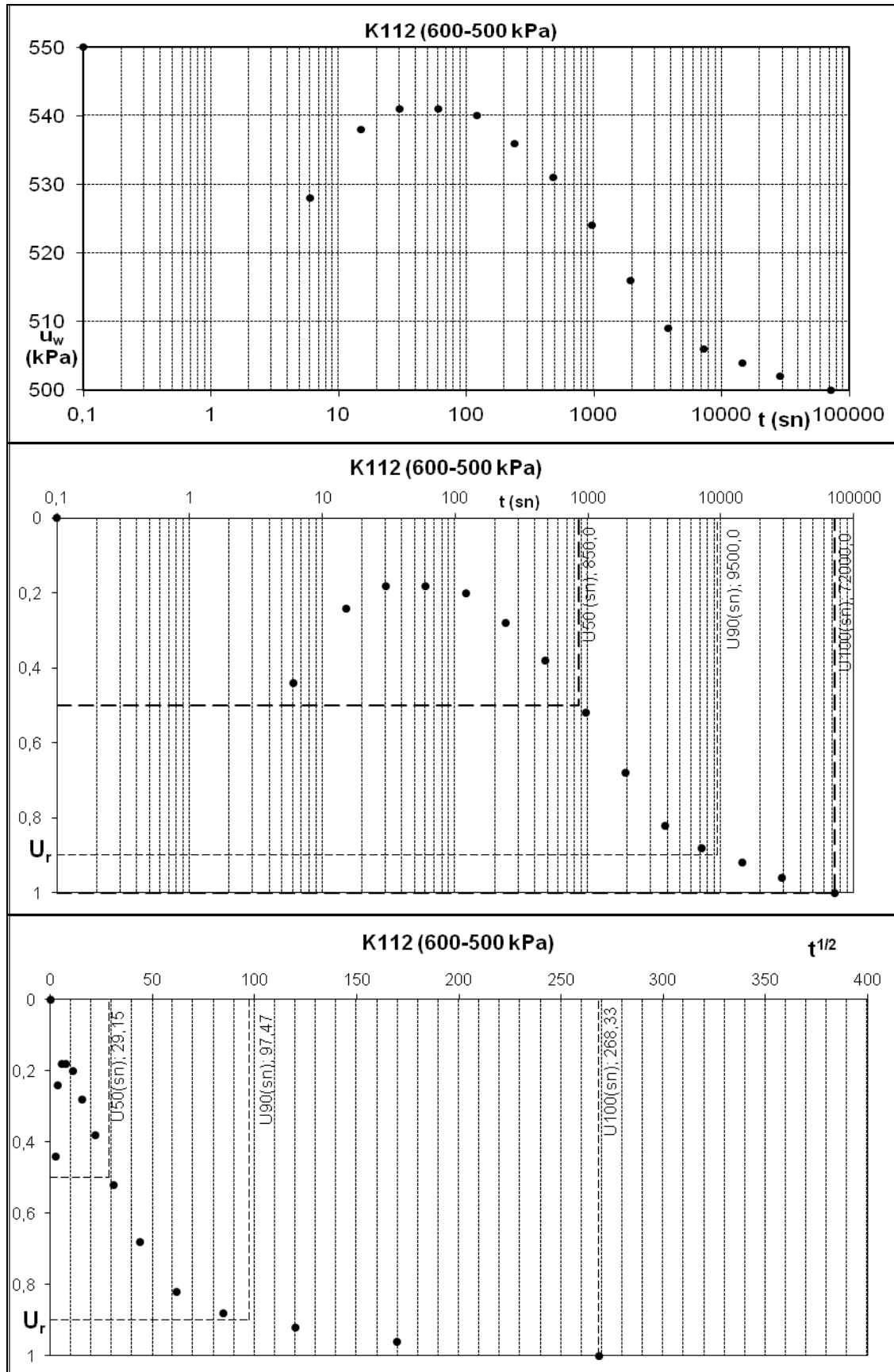
K096

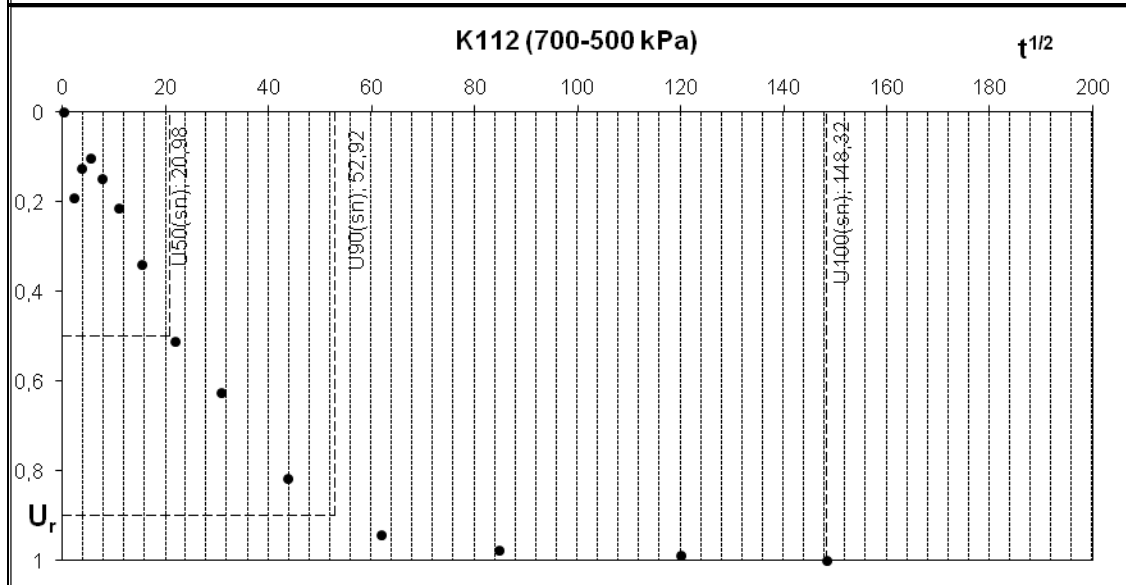
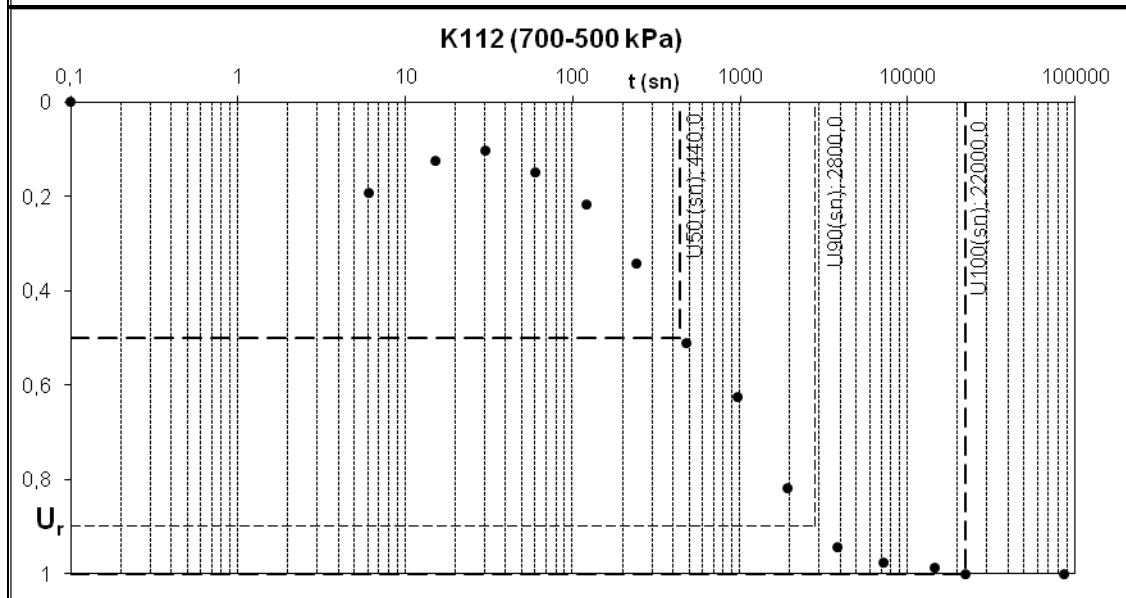
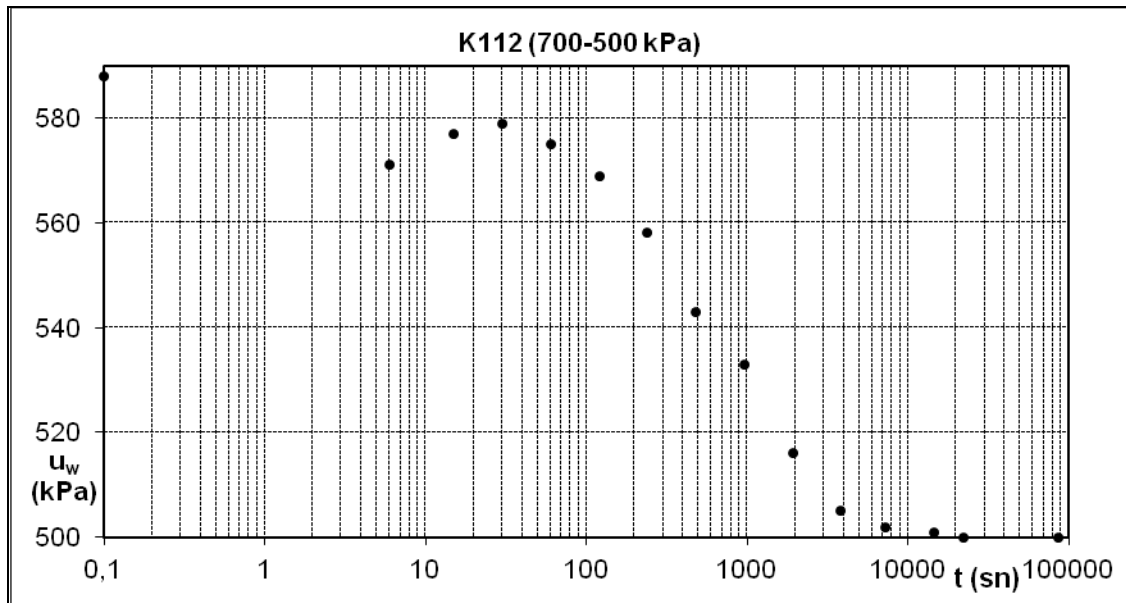


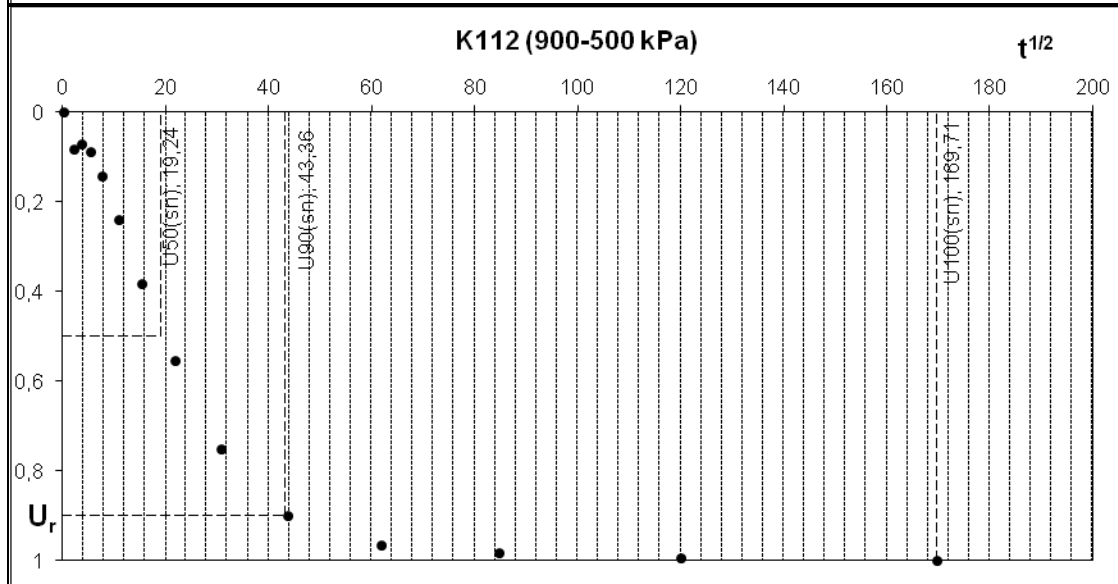
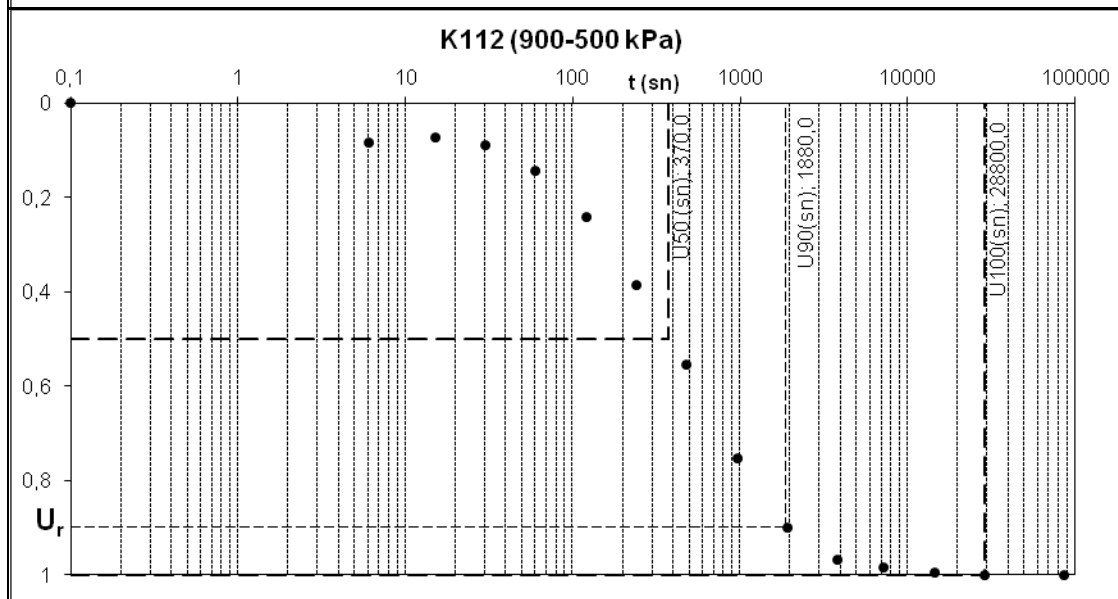
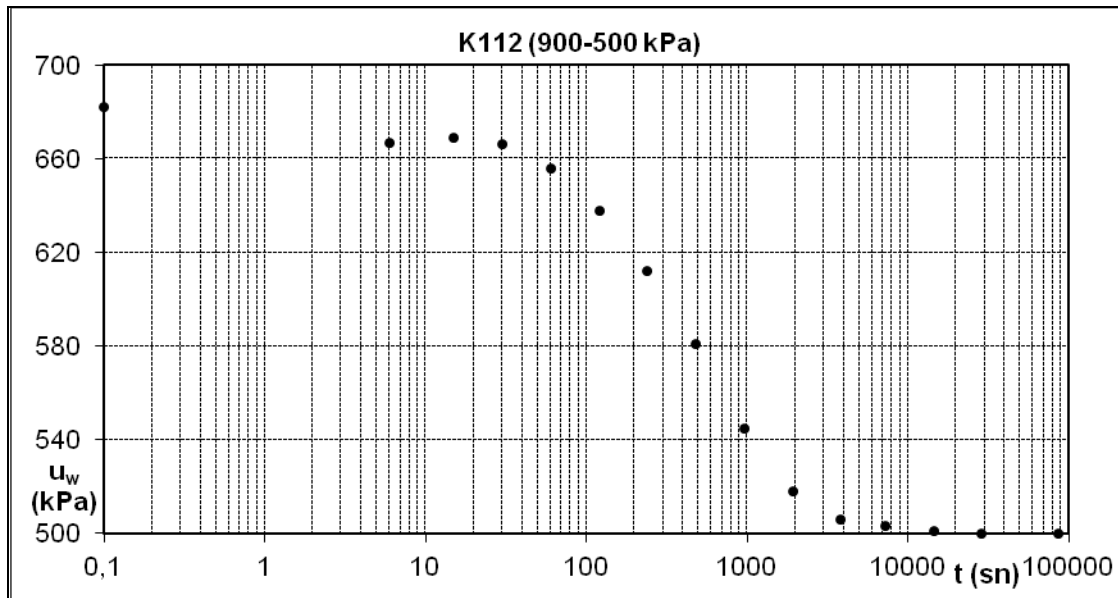




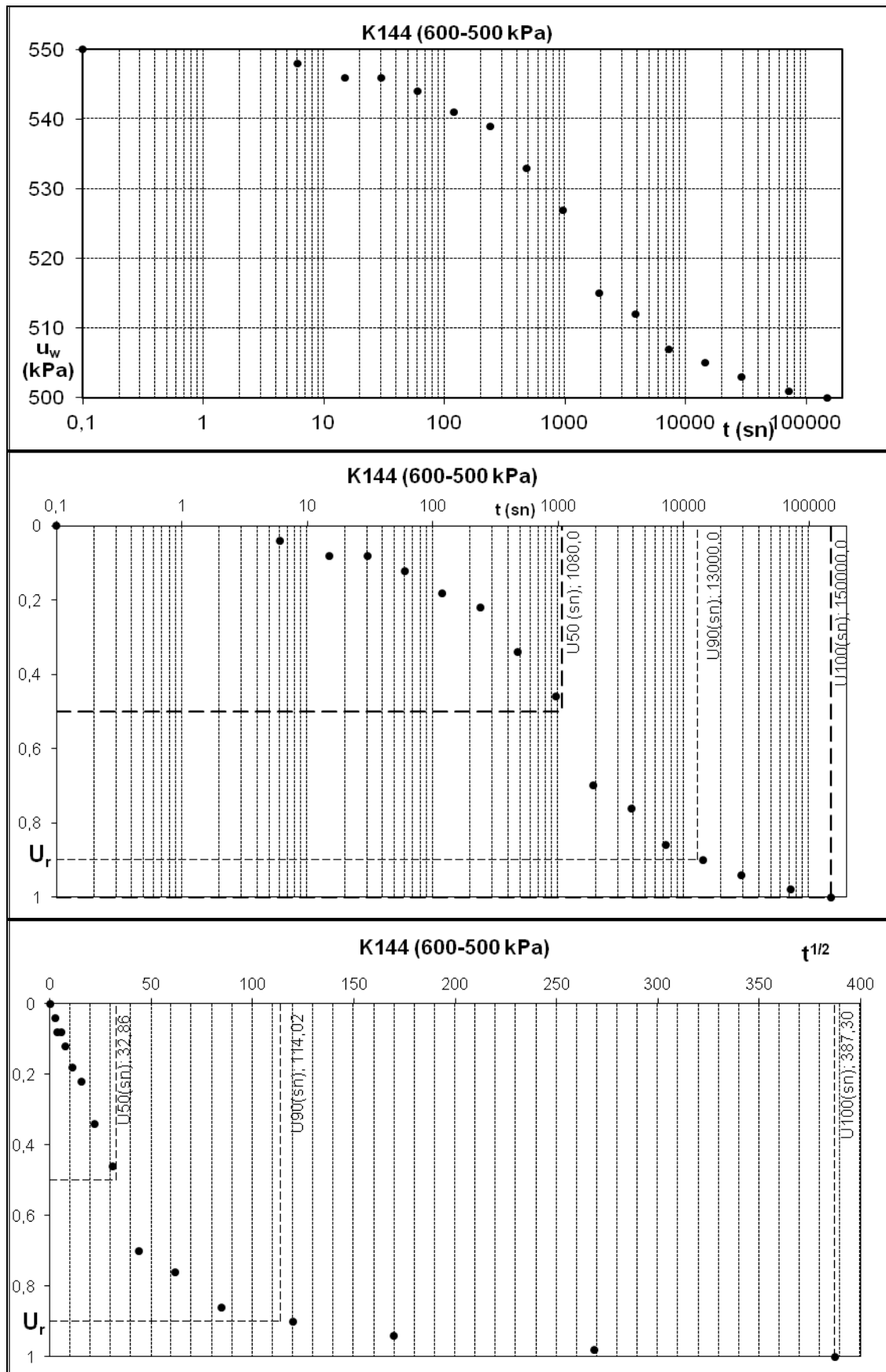
K112

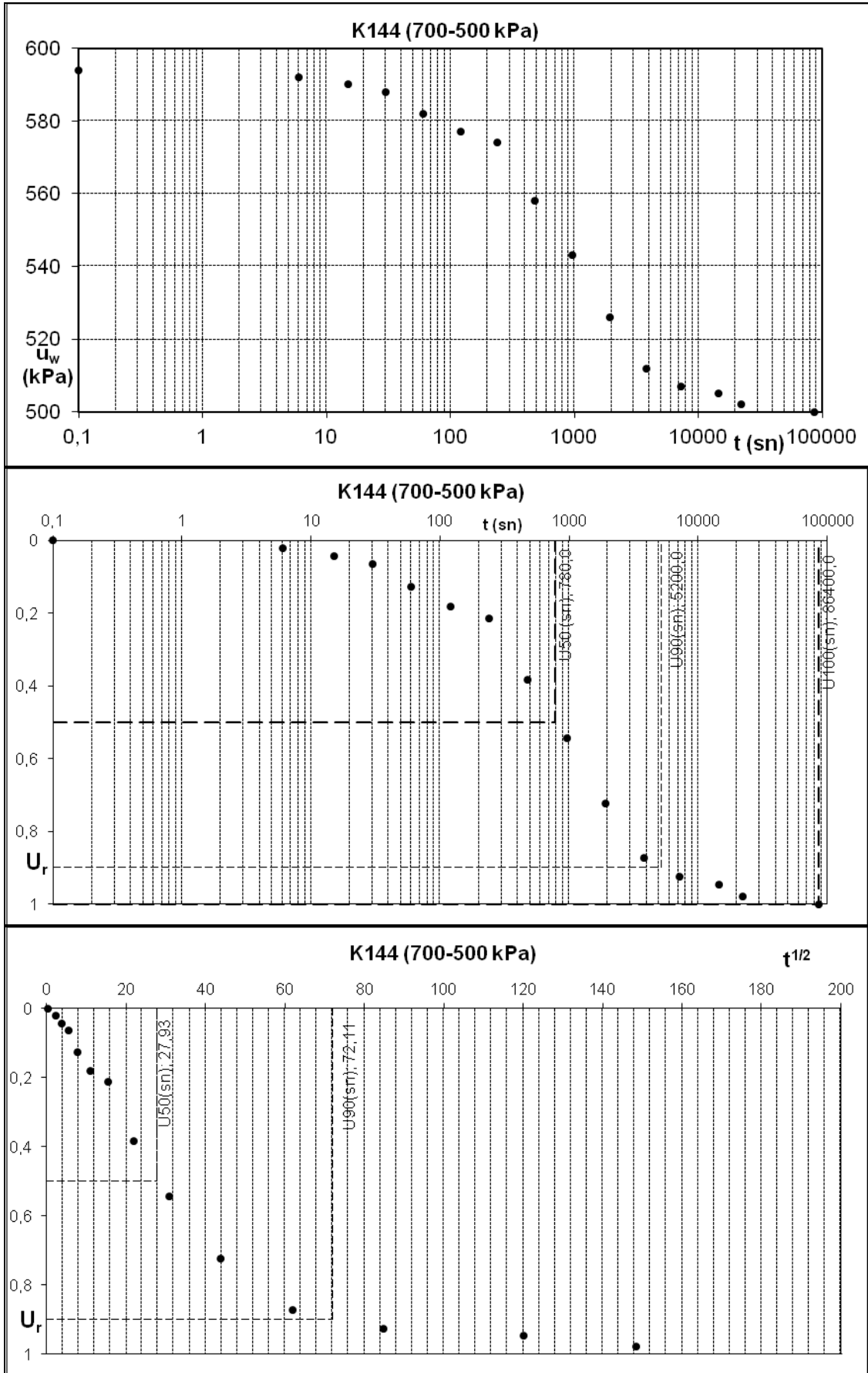


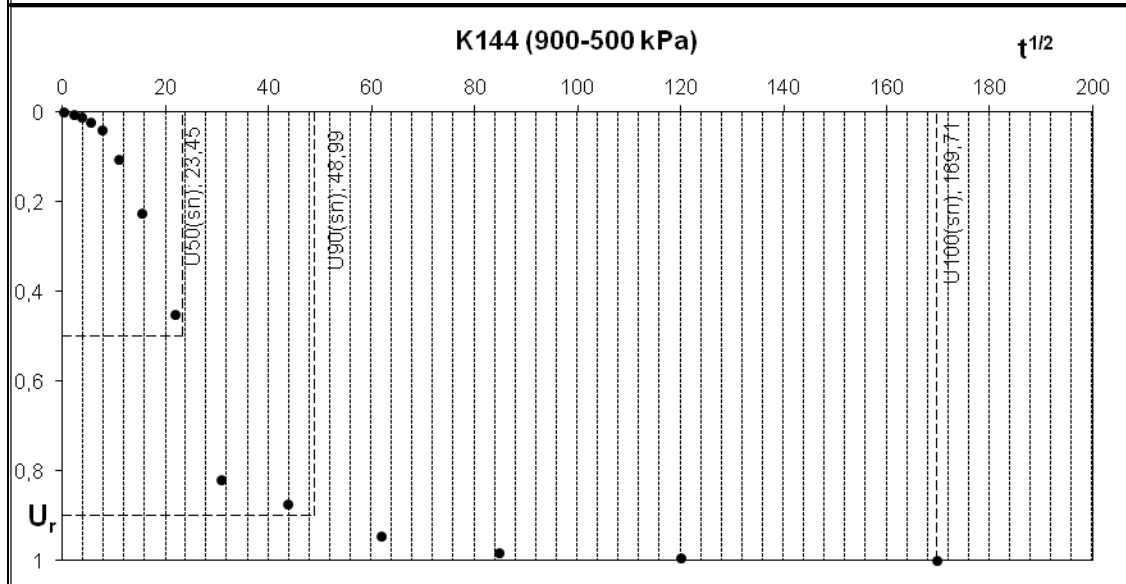
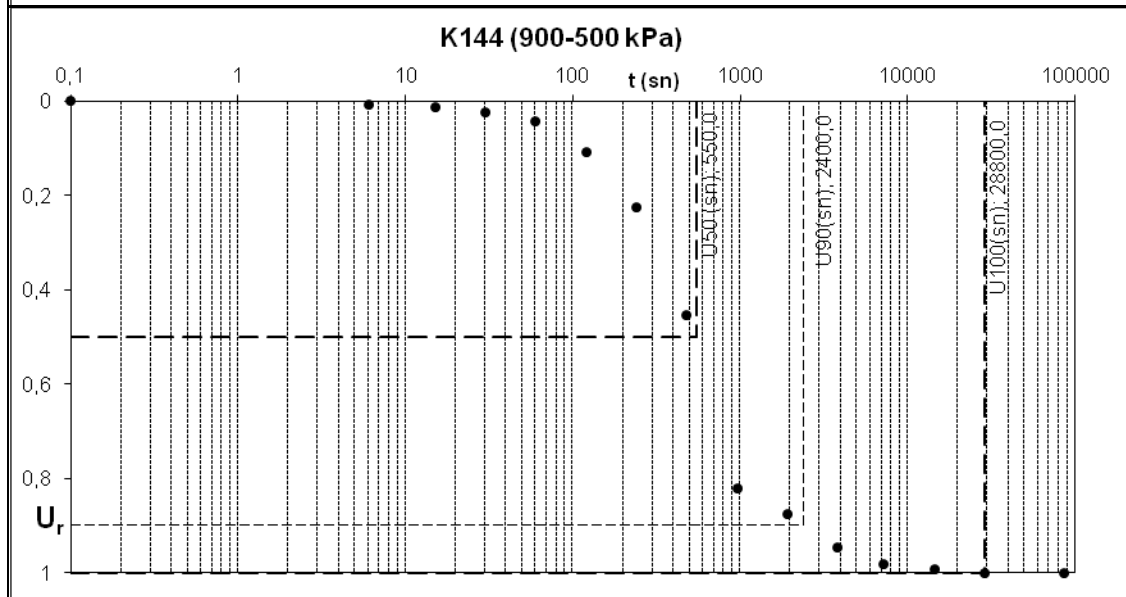
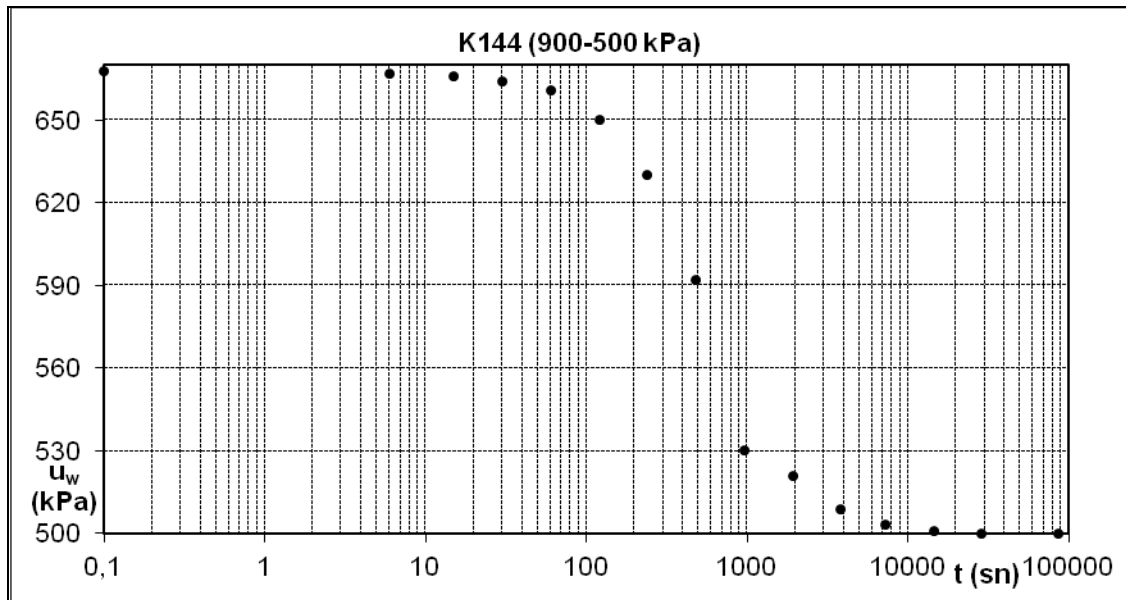




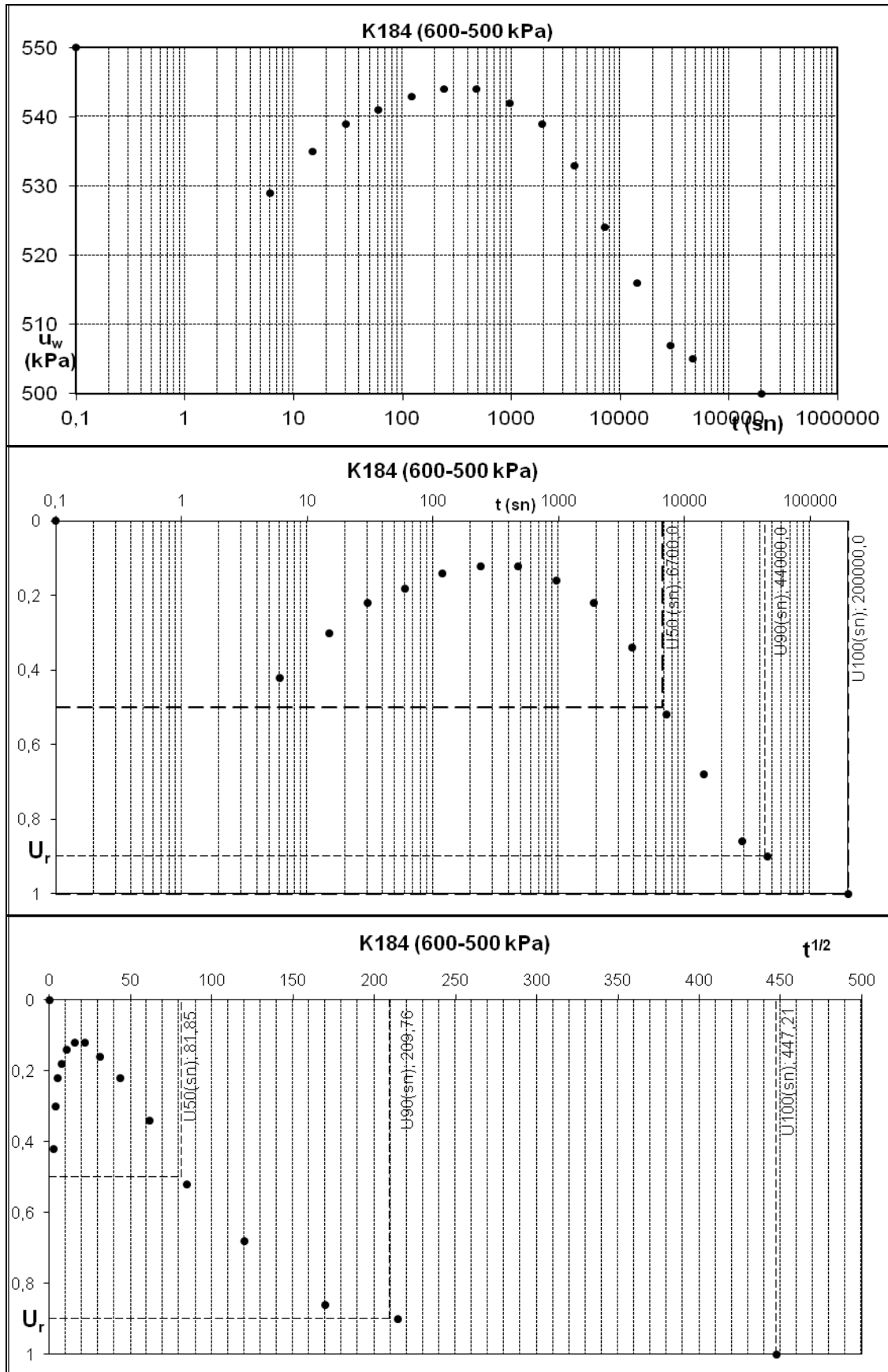
K144

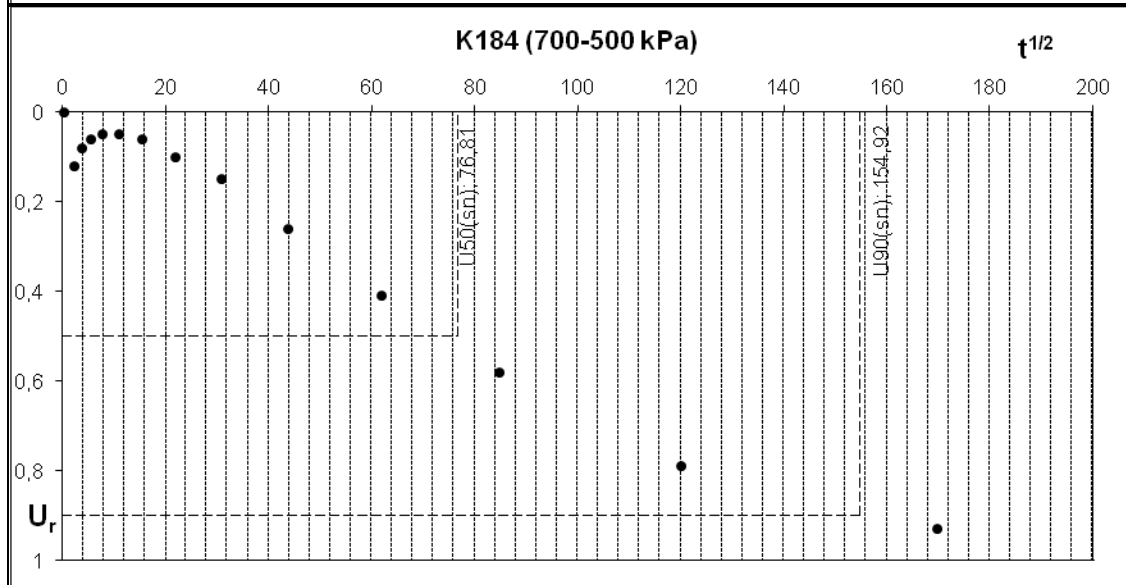
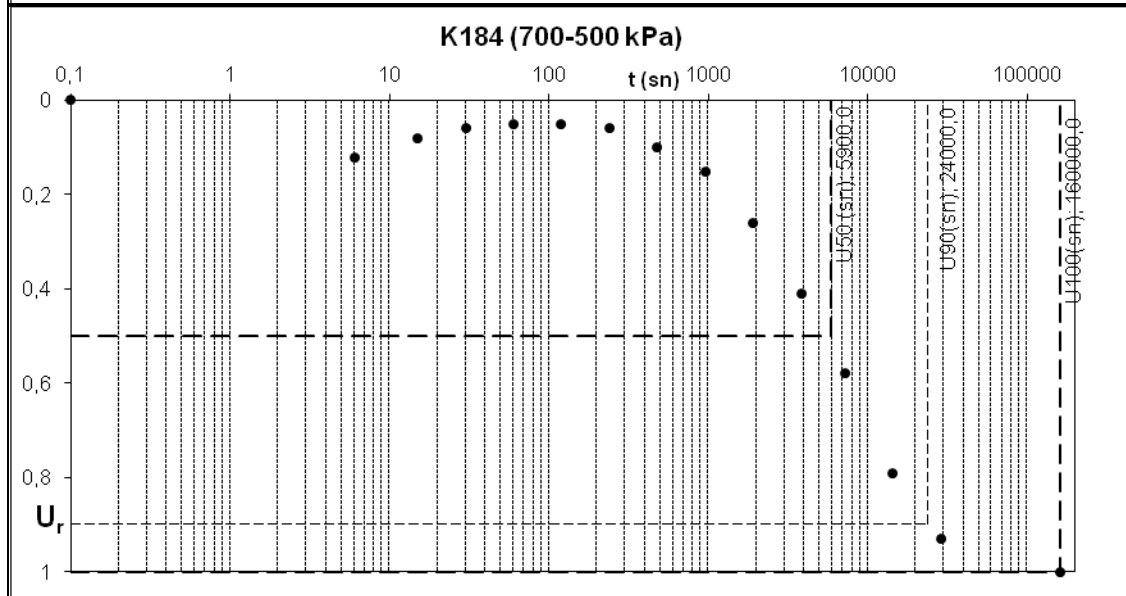
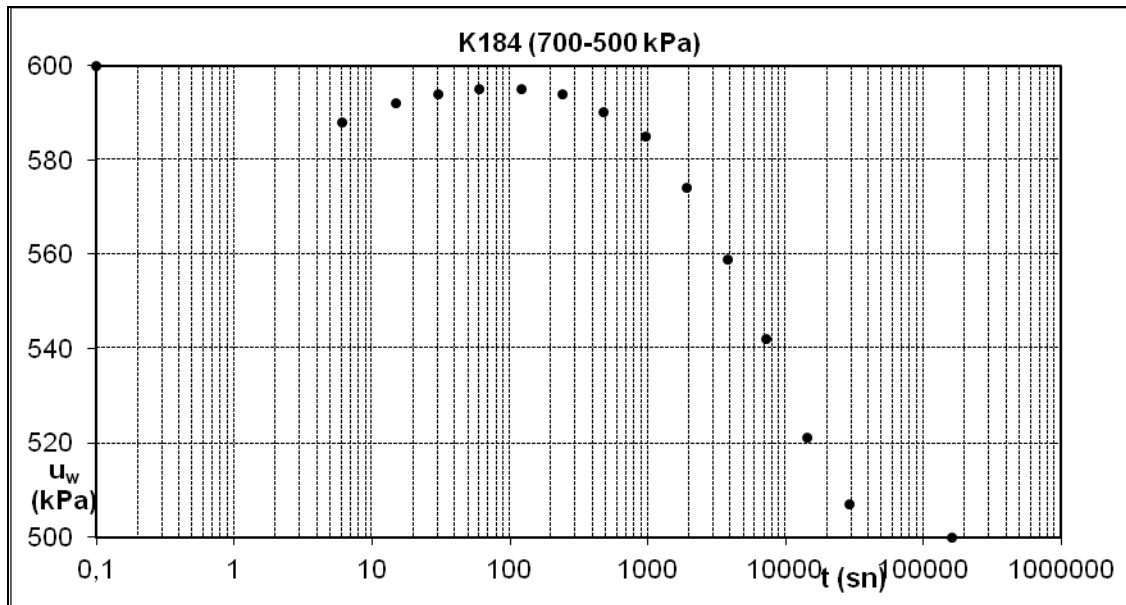






K184





ÖZGEÇMİŞ

Mehmet TAPAN,12.12.1983 Kırıkhan / HATAY doğumlu olup aslen Trabzon'ludur. Dört çocuklu ailenin ikinci çocuğu olup, babası emekli, annesi ev hanımıdır. İlköğrenimini Kırıkhan / HATAY'da, ortaöğrenimini Keçiören / ANKARA'da, önlisans programını Kırıkkale Üniversitesi Kırıkkale Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü'nde tamamlamıştır. Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2009 bahar döneminde mezun olmuştur. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazanmıştır.