



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

# Materiallegenskaper och nedbrytningsmekanismer

Robert Lundström

# Agenda



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- Teori - materialegenskaper och modellering
- Karaktärisering av vägbyggnadsmaterial inom forskningen
- Hur används materialegenskaper och nedbrytningsmodeller vid praktisk dimensionering i Sverige



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

# 1. Teori – materialegenskaper och modellering

# Konstitutiva samband och parametrar



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

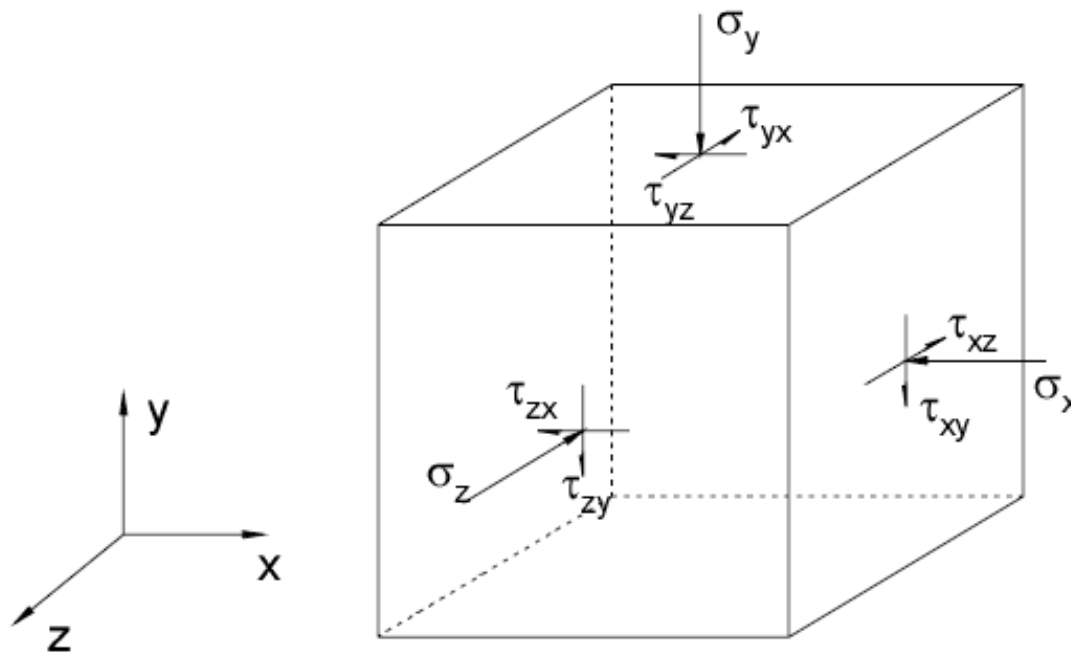
- **Konstitutiva ekvationer** är samband mellan två fysiska kvantiteter som är specifika för ett material eller substans
- **Kontinuumsmekanik**: gren inom mekaniken för deformerbare medier, där jämvikt, rörelse och deformation studeras hos fysikaliska kroppar utan avseende på den inre (mikroskopiska) strukturen hos materialet
- Inom kontinuumsmekaniken fokuseras normalt på två tillståndsvariabler: **spänningar** och **töjningar** men även **tid** och **temperatur**

# Spänningar i 3D

- Spänningar för ett givet infinitesimalt element ges av 9 spänningskomponenter varav 6 är oberoende



ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY



Tensor

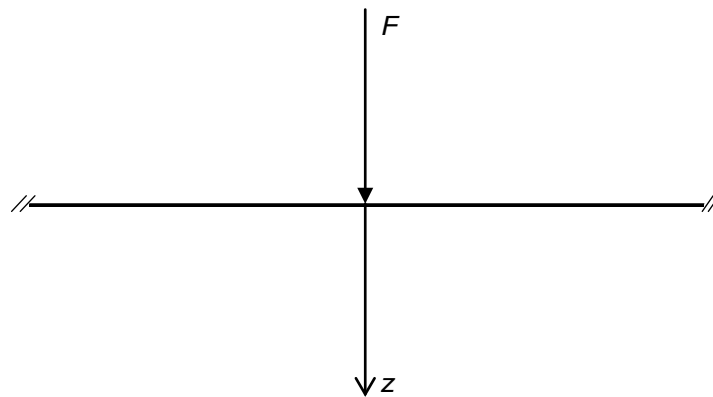
$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

# Bakgrund strukturmodellering: - Boussinesq (1885)

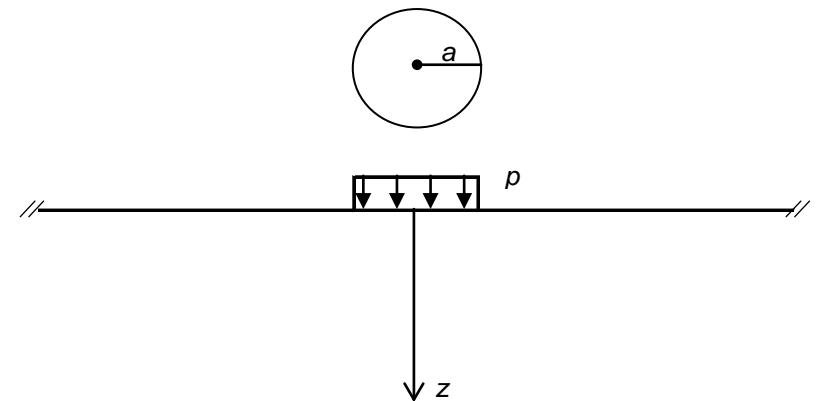
- Analytisk lösning för spänningar och töjningar i elastisk halvrymd
- Punktlast (senare generaliserad till cirkulär utbredd last)



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY



$$\sigma_z = \frac{3F}{2\pi z^2}$$



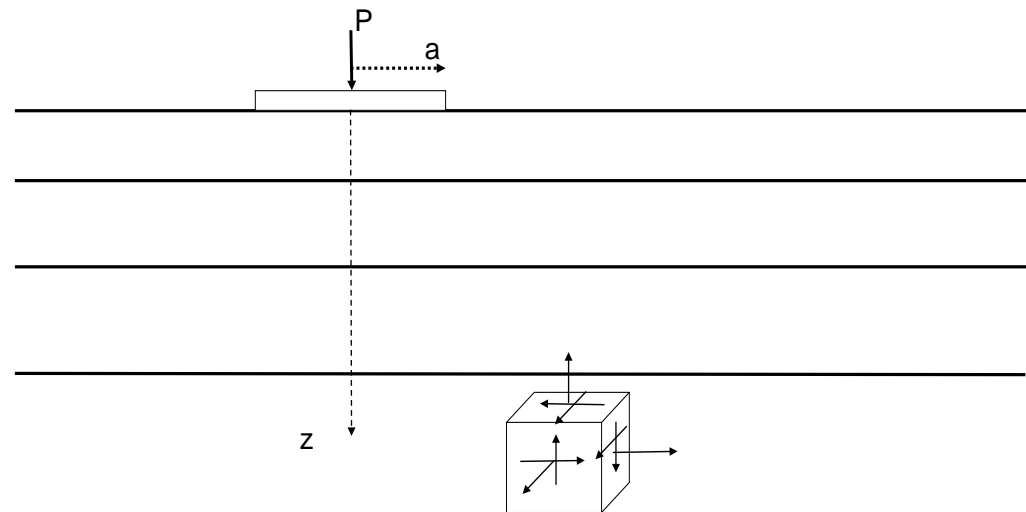
$$\sigma_z = p \left( 1 - \left( \frac{1}{1 + a^2/z^2} \right)^{3/2} \right)$$

# Strukturell dimensionering

## - Mekanistisk-empirisk modellering

- Normalt baserad på:

- lastmodell: statisk belastning/rörlig/dynamisk
- strukturmodell: analytisk/numerisk
- materialegenskaper



# Fenomen inom kontinuumsmekaniken forts.



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- *Elasticitet*: omedelbar respons vid belastning och fullständig återgång vid avlastning
- *Viskositet*: respons vid på- och avlastning beror på hastigheten
- *Viskoelasticitet*: tidsberoende respons vid på- och avlastning, normalt även beroende på storleken och hastigheten hos påkänningen



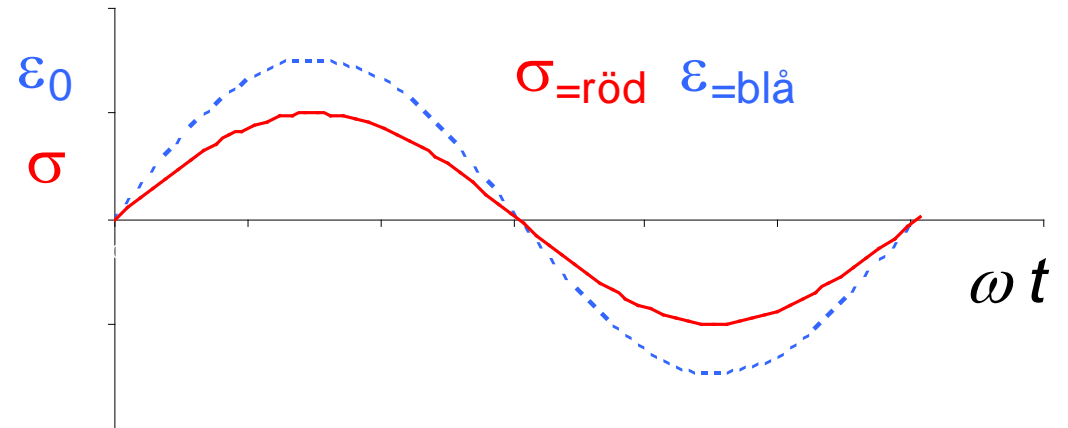
# Elasticitet



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

Hookes lag

$$\sigma \equiv E \cdot \varepsilon$$



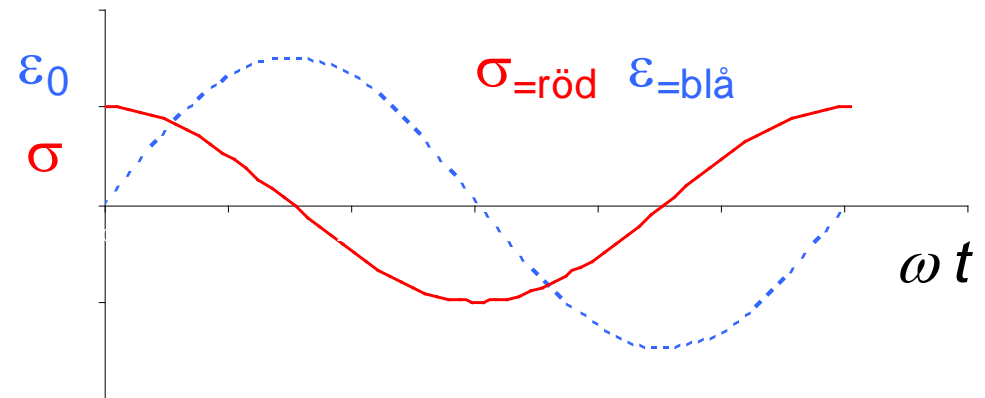
# Viskositet



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

Newtons lag

$$\tau \equiv \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt}$$



# Linjär viskoelasticitet



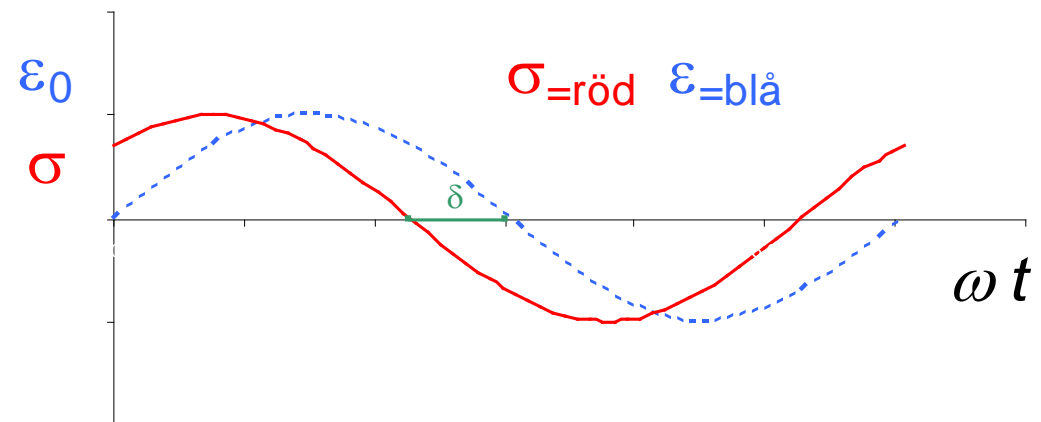
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Linjär viskoelasticitet

$$\sigma(t) \equiv \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau$$

Dynamisk modul vid jämvikt och sinusformad belastning

$$|E^*| \equiv \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

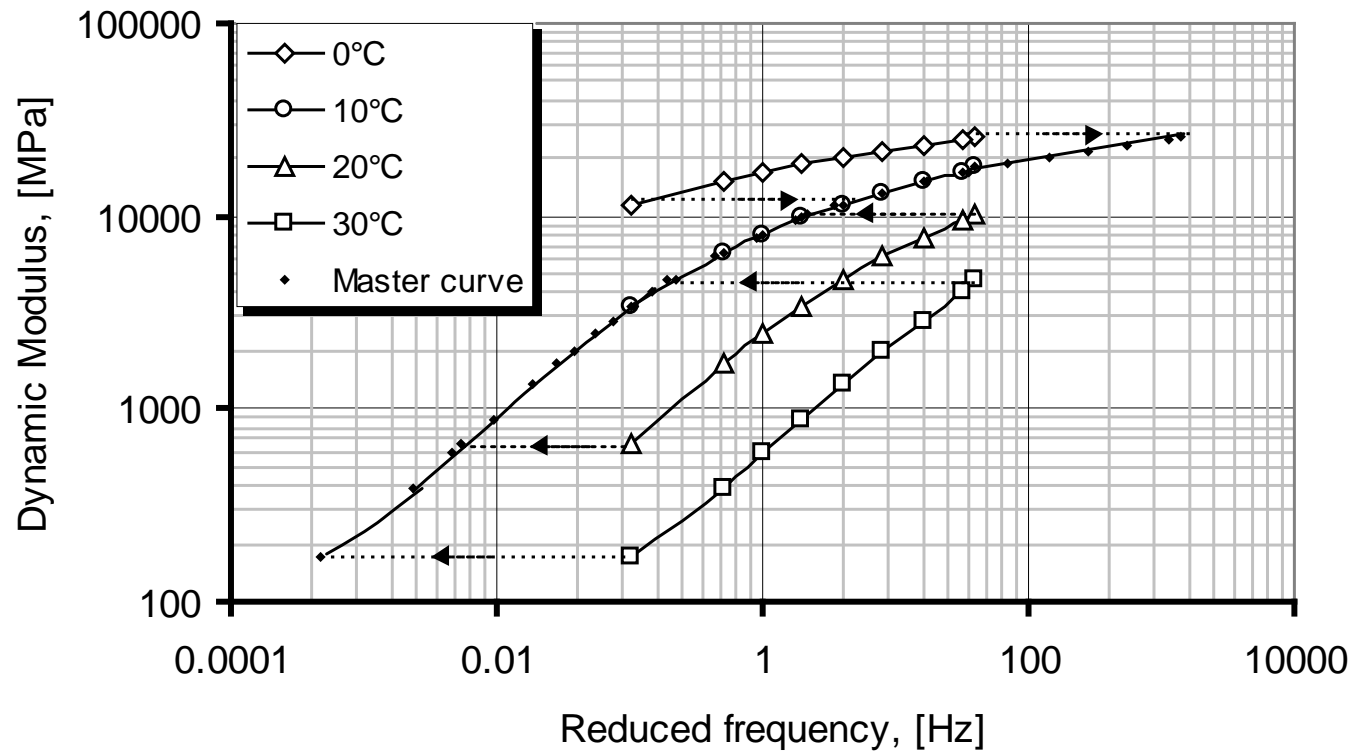


$$\delta \begin{cases} = 0^\circ \text{ för elastiska material} \\ = 90^\circ \text{ för viskösa material} \end{cases}$$

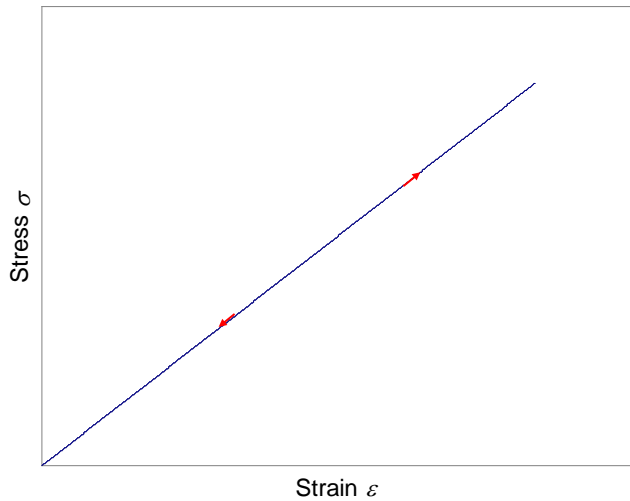
# Viskoelasticit – temperaturens inverkan



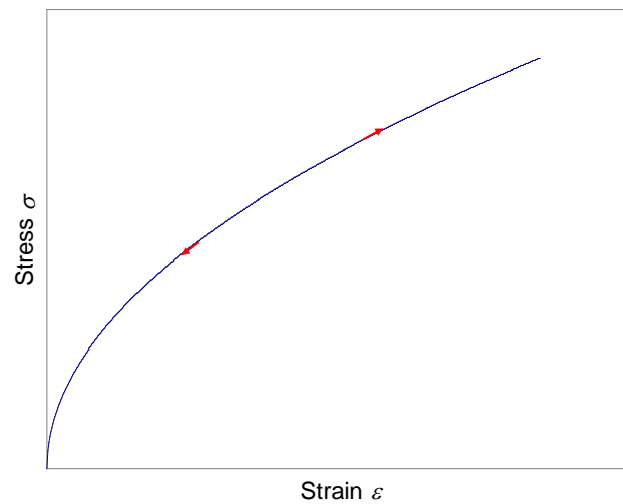
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY



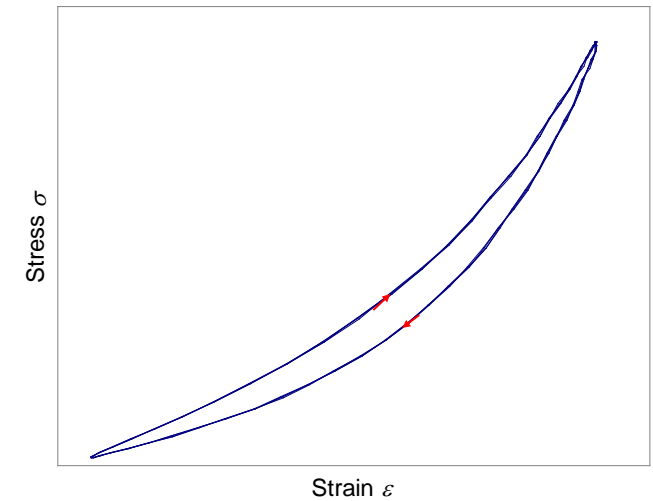
# Elasticitet och olinjäritet



linärelastiskt



olinjärt elastiskt



Icke elastiskt

# Nedbrytning



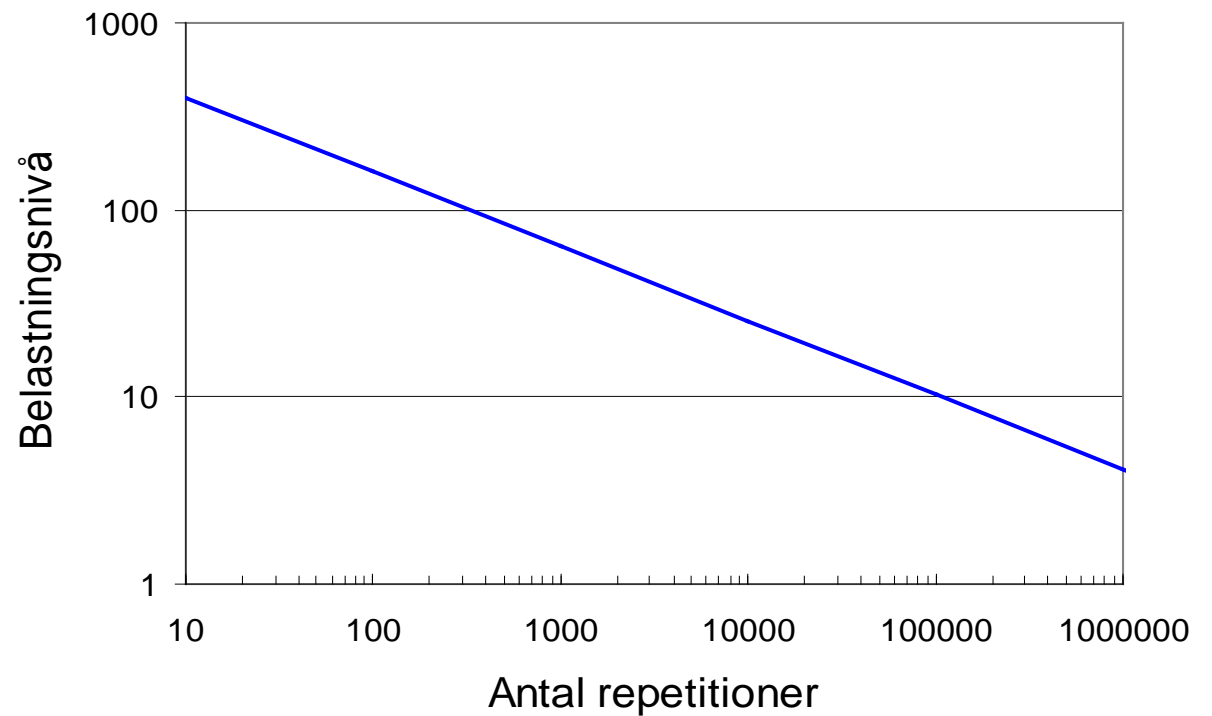
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- Materialets maximala hållfasthet (för en belastningscykel)
- Materialets hållfasthet beroende på antalet belastningar

# Generellt samband för successiv nedbrytning

$$N = \left( \frac{a}{\varepsilon} \right)^b$$

- $N$  är antalet tillåtna belastningar
- $\varepsilon$  är töjning
- $a, b$  regressionsparametrar



# Teori- slutsatser



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- Modellering av vägar kan göras med analytiska strukturmodeller där materialegenskaper ingår
- Det finns ett antal materialmodeller som kan användas för att idealisera beteenden bl.a. elasticitets- och viskoelasticitetsteori
- Är påkänningarna i ett material alltför stora men mindre än den maximala brotthållfastheten så sker succesiv nedbrytning (utmattning).





ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

## 2. Karaktärisering av vägmaterial inom forskningen

# De vanligaste nedbrytningsmekanismerna

1. Spårbildning orsakad i asfalten
2. Ytinitierad sprickbildning
3. Längdsgående ojämnheter
4. Otillräcklig friktion
5. Längdsgående sprickbildning
6. Sprickbildning orsakad i underkant beläggning
7. Generell sprickbildning
8. Stensläpp från beläggningsen
9. Spårbildning orsakad i obundna lager
10. Tjälskador
11. Nötningsslitage
12. Lågtemperatursprickor

COST 333, 1999

# P 1: Spårbildning i bundna lager: låg deformationsresistens



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY



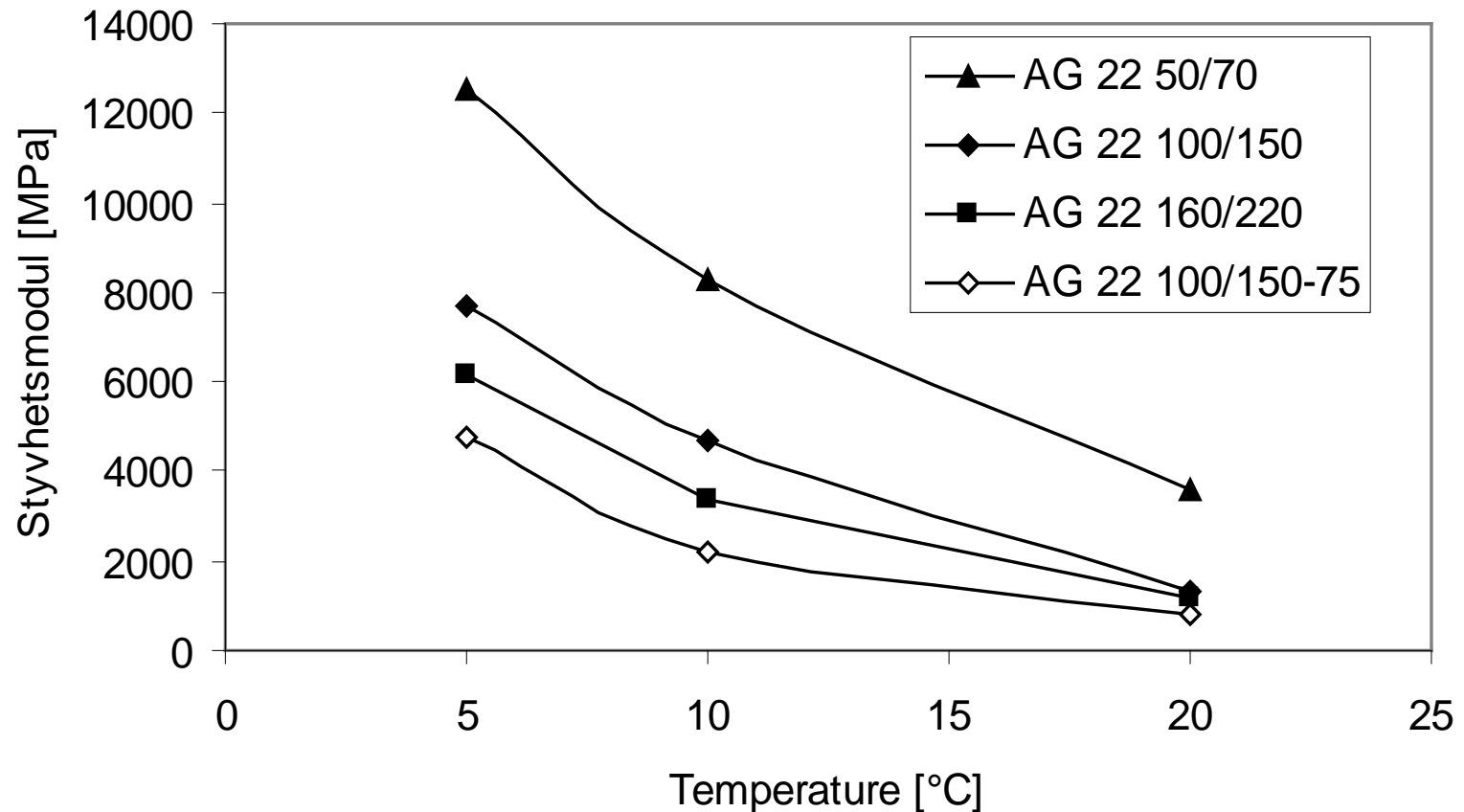
# Styvhet/deformationsresistens hos asfalt – Provningsmetoder



2-Point-bending	3-Point-bending	4-Point-bending	Supported-bending	Indirect tensile

Används i Sverige och  
stöds av TRVs regelverk

# Styvhets- (elasticitets-) modul hos asfalt



Styvhetsmoduler för asfalt AG 22 vid olika temperaturer enligt FAS Metod 454-98

# P6: utmattningssprickor

# P9: deformationer i obundna material

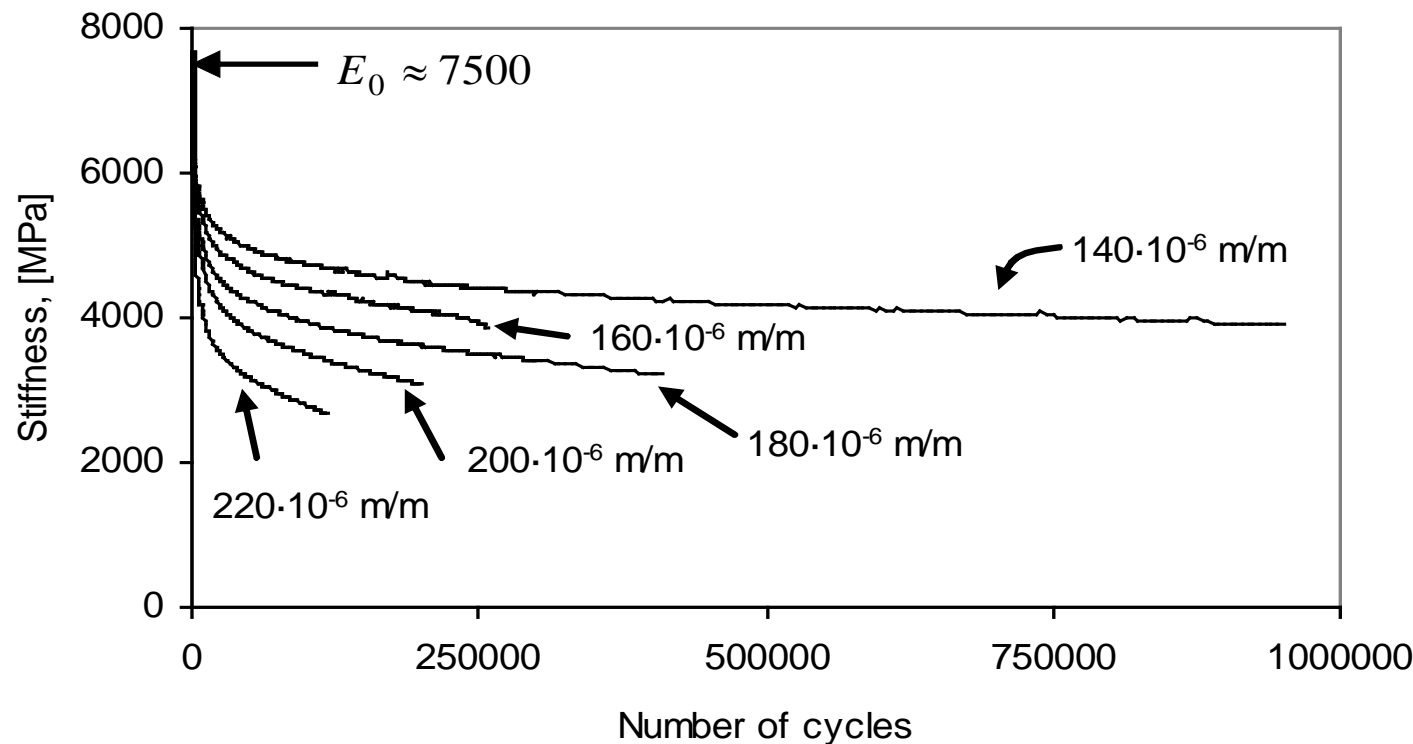


ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY



# Utmattningsprovning av asfalt

- Normalt samma utrustning som provning av styvhetsmodul
- Förstörande provning
- Olika lastnivåer
- Ju större last, desto snabbare nedbrytning
- Olika temperaturer
- Omfattar oftast endast det nedersta asfaltlagret



# Materialkaraktärisering av obundna material

Provningsmetoder, t.ex:

- Triaxial skjuvprovning
- Resilientmodul
- Direkt skjuvning
- California Bearing Ratio (CBR)
- Fallviktsprovning – Bakräknade modul
- (Klassificering)



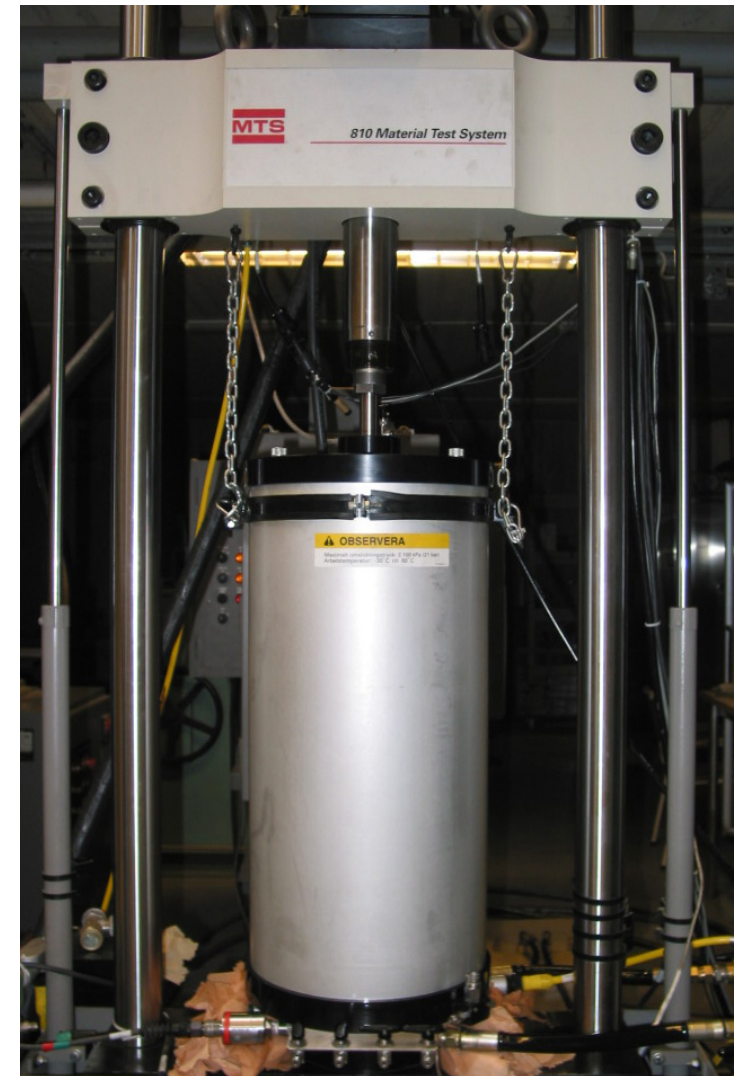
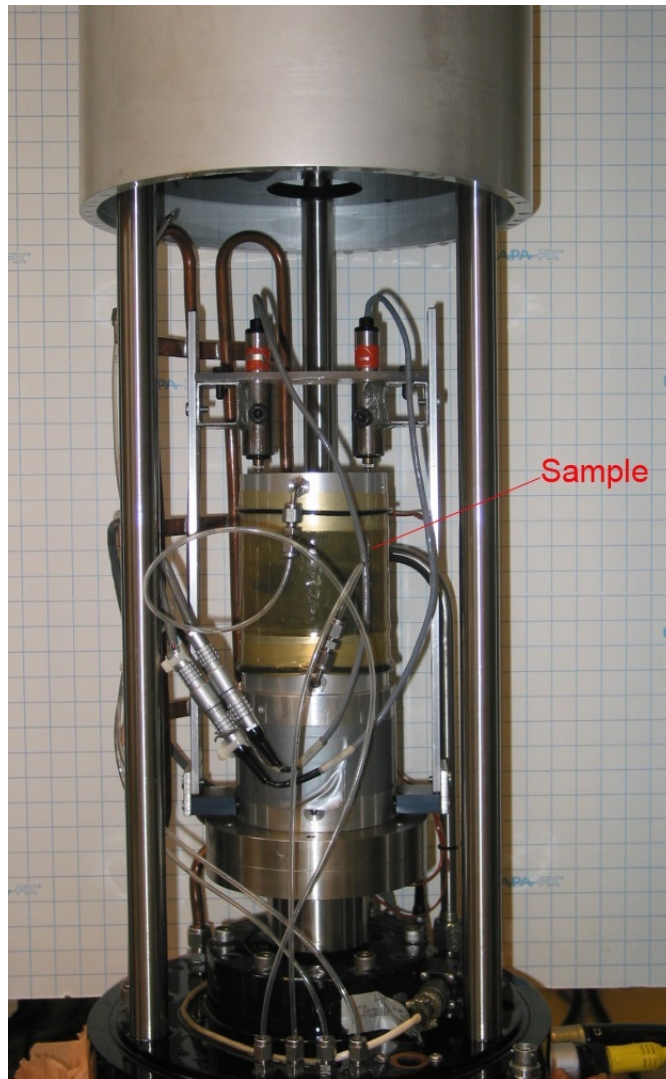
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY



# Triaxialprovning



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

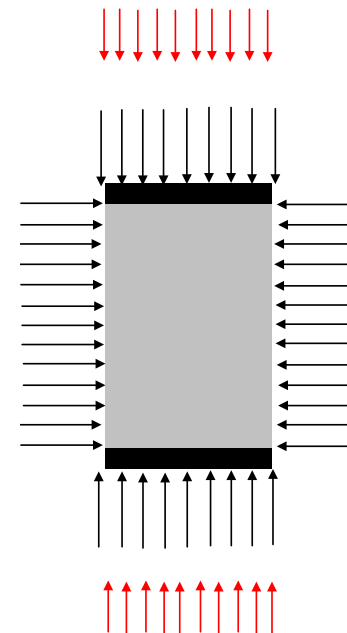


# Obundna material - triaxialprovning

- Konstant sidotryck
  - Mest förekommande
  - Enkel utrustning
  - Medför relativt enkel modellering
  - Flera olika belastningsnivåer kan användas
- Cykliskt sidotryck
  - Mer komplext
  - Komplex modellering



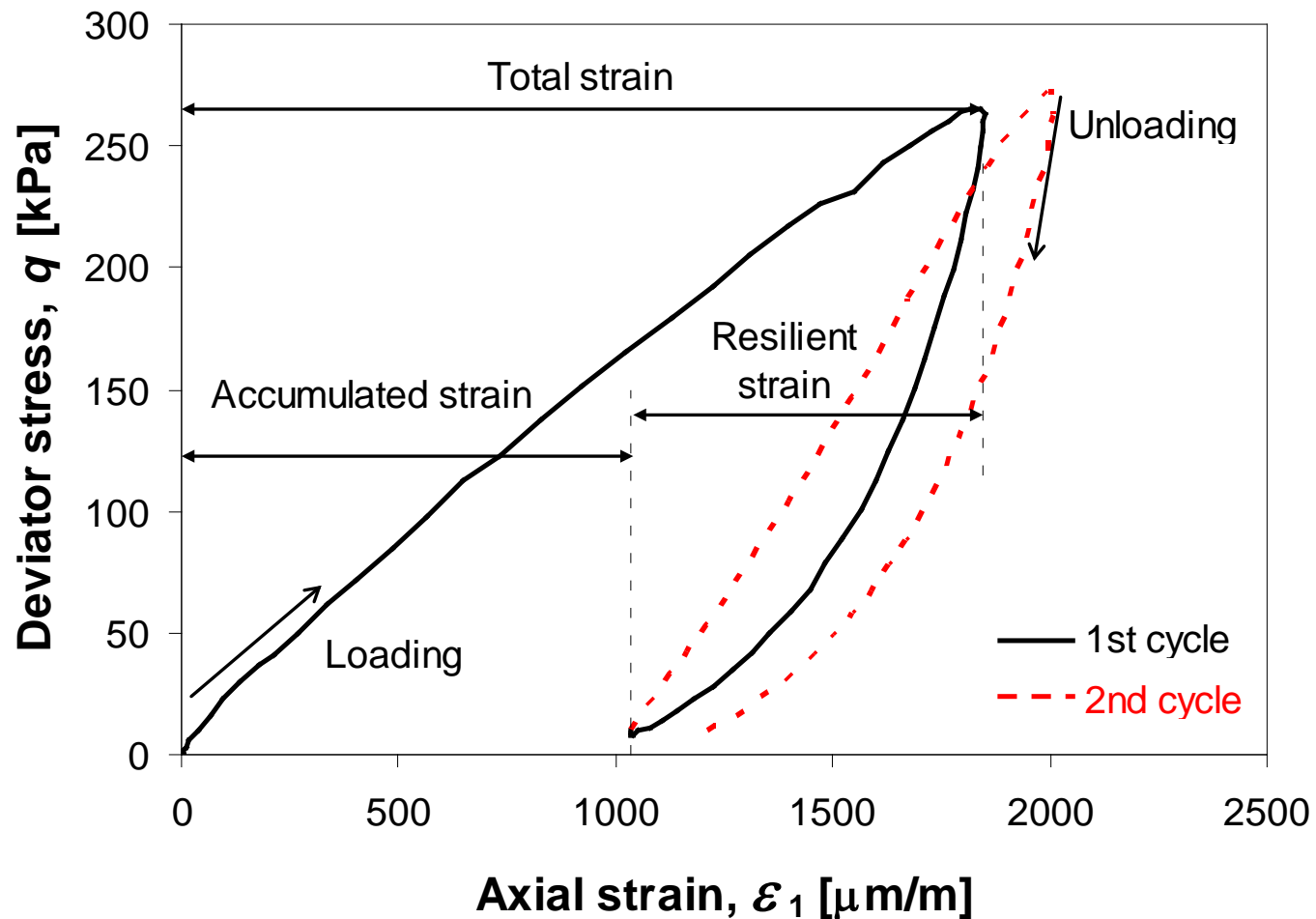
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY



# Styvhet hos obundna material - resilientmodul



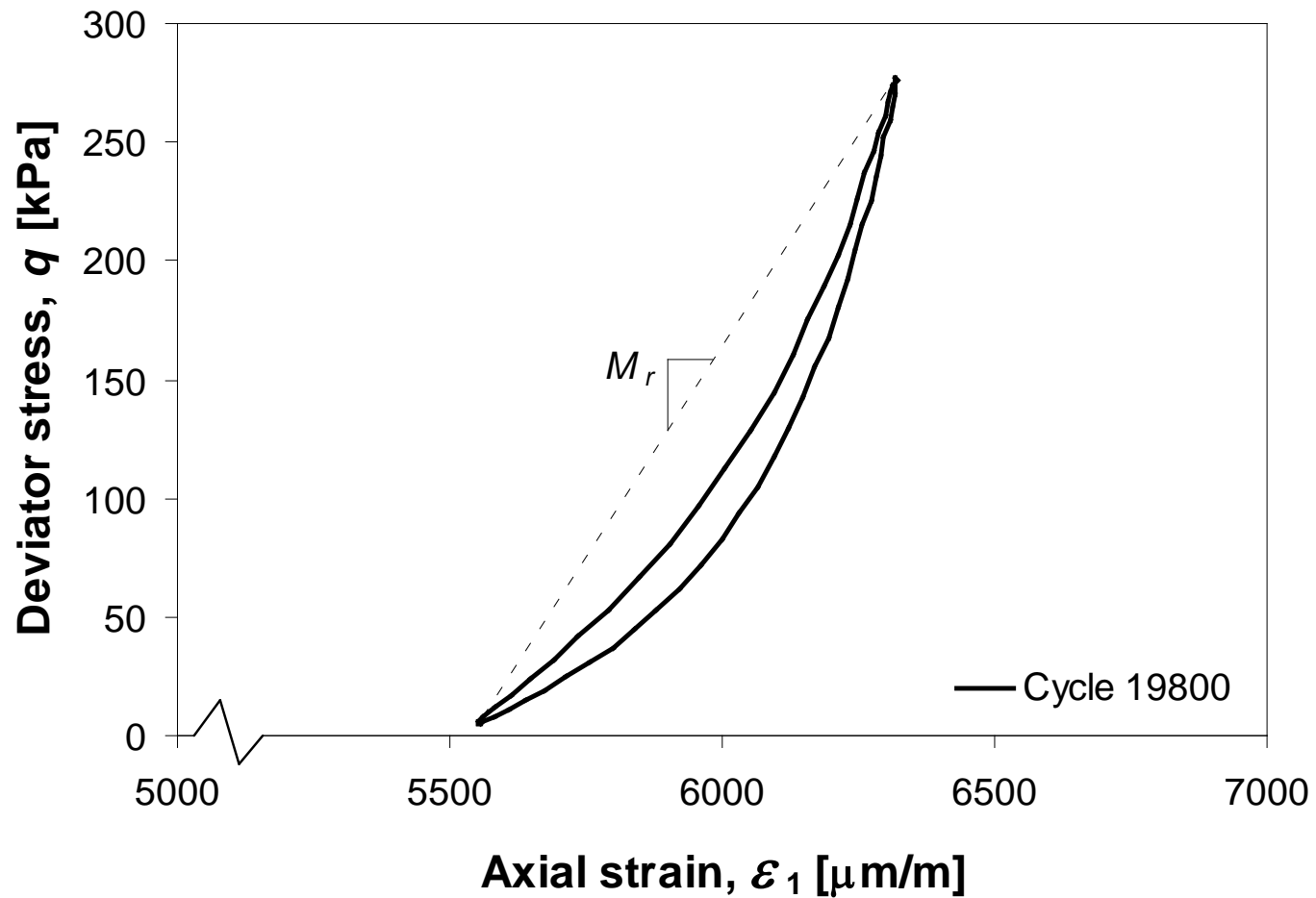
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY



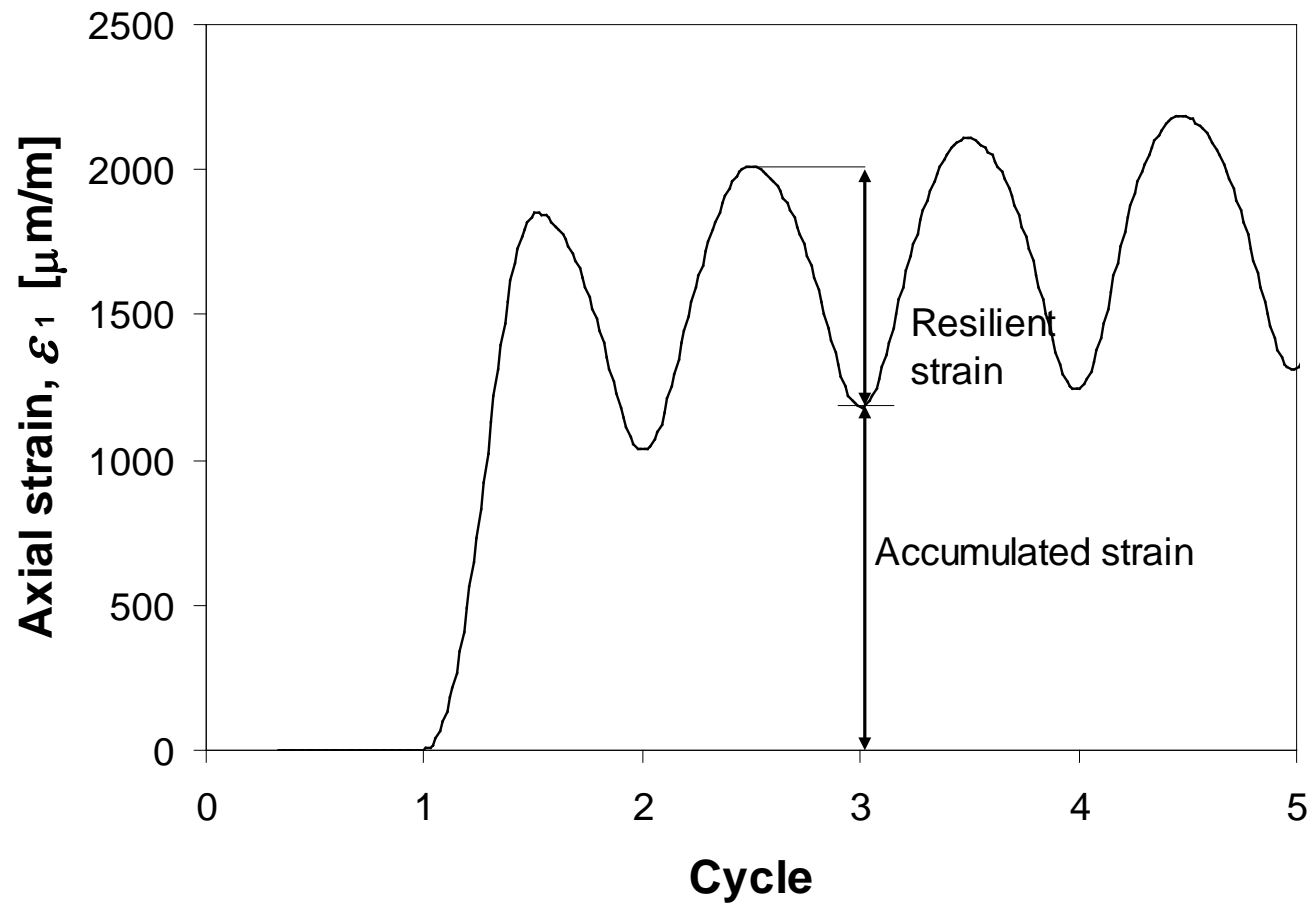
# Resilientmodul



ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY



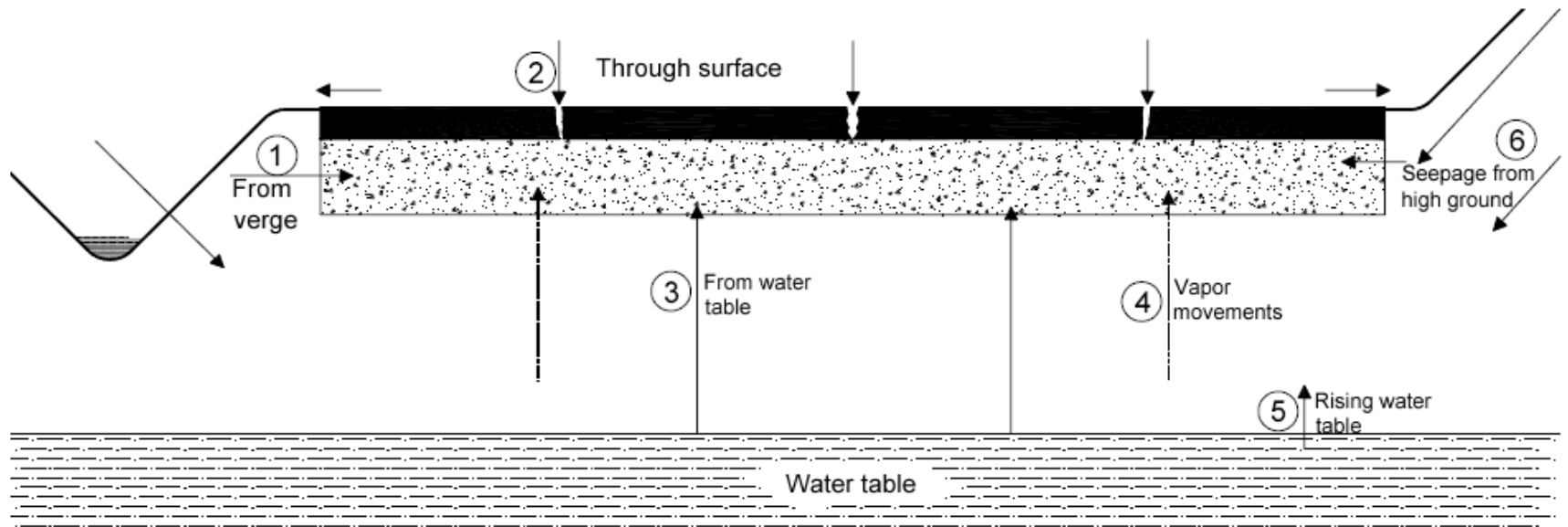
# Styvheten hos obundna material - tidsberoende



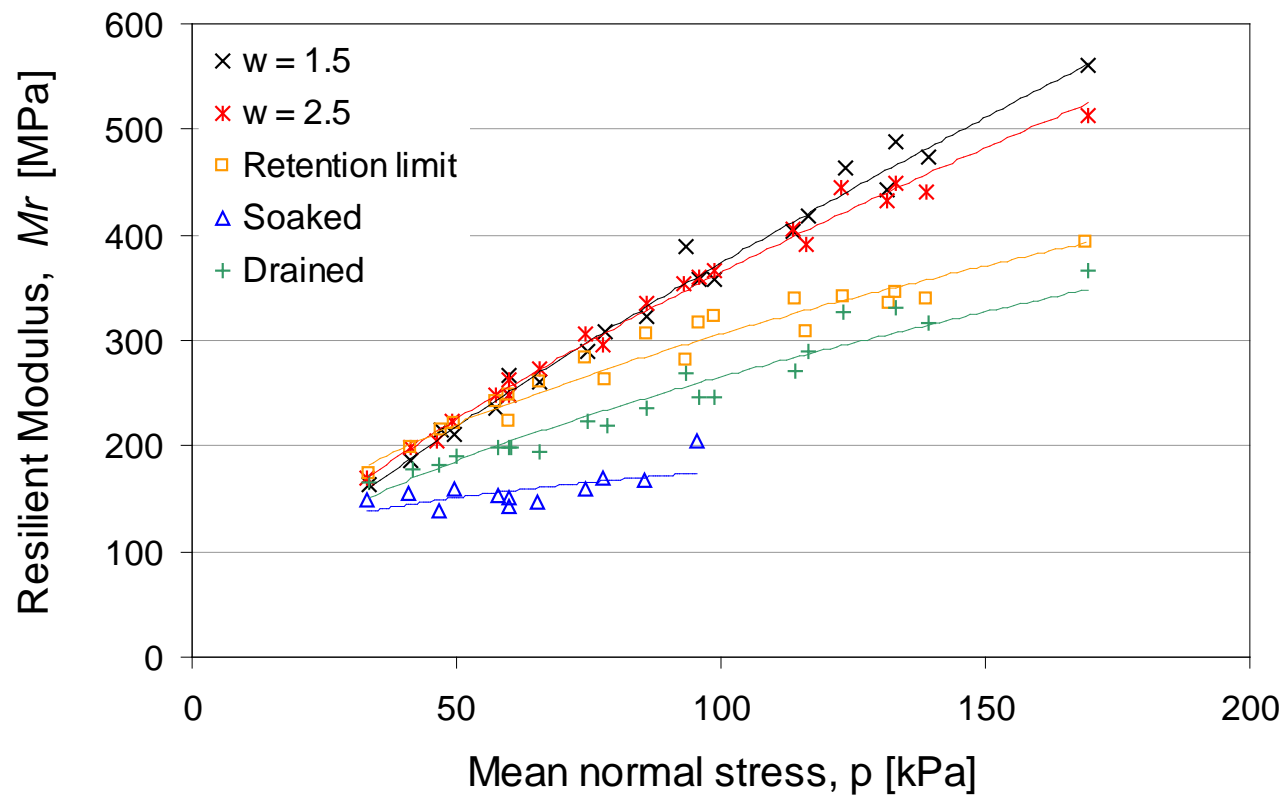
# Inverkan av klimat



ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY



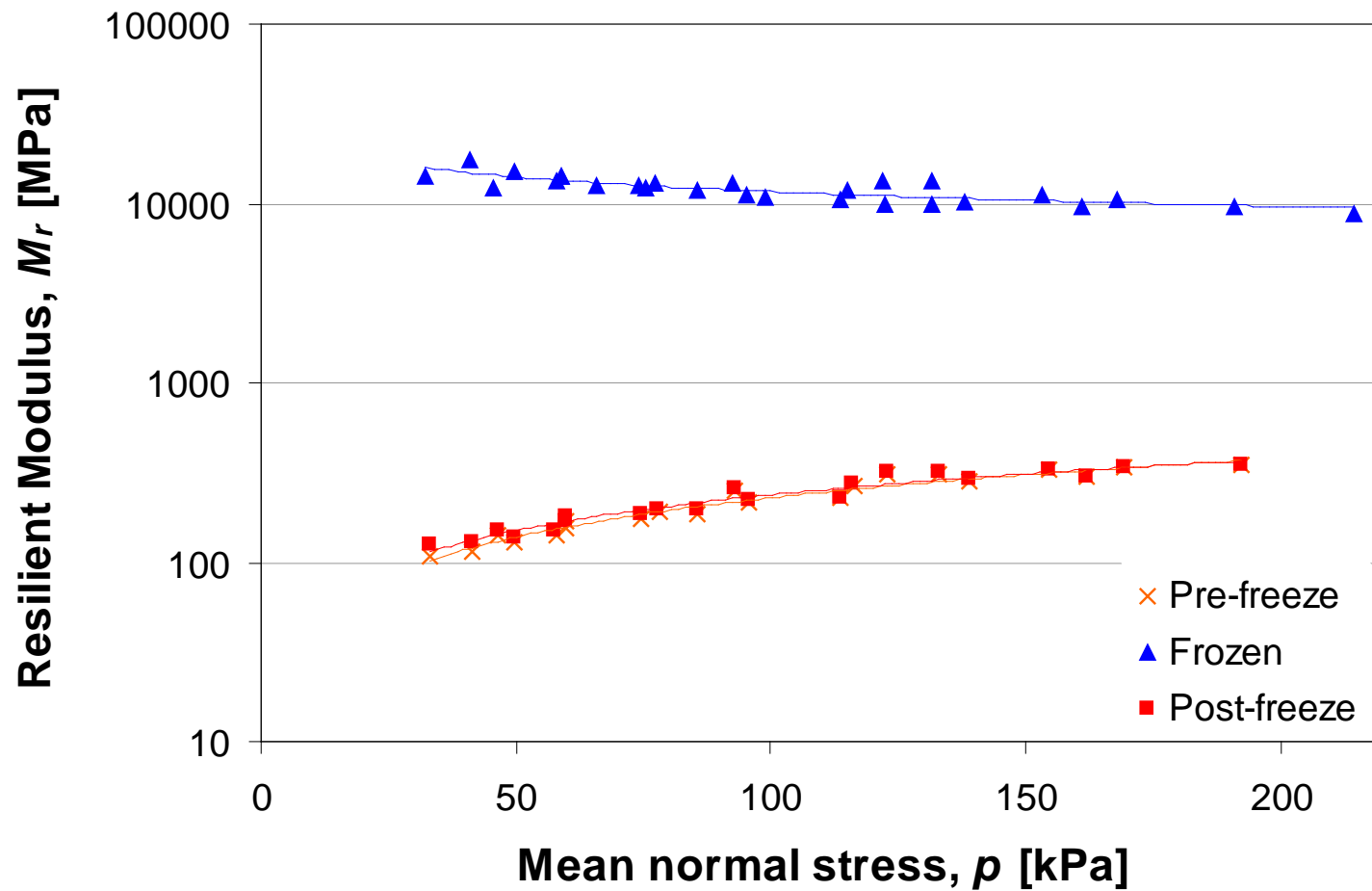
# Styvhet hos obundna material - inverkan av vattenförekomst



# Tjäle



ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY





# Övriga nedbrytningsmekanismer

- fångas ofta med krav på delmaterial, t.ex:



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- Nötningsresistens förbättras med högre krav på kulkvarnsvärde
- Motståndskraft mot sprickbildning styrs med krav på bitumen
- Beständighet fångas med krav på vidhäftningsmedel

# Sprickor

- Lågtemperatursprickor



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY



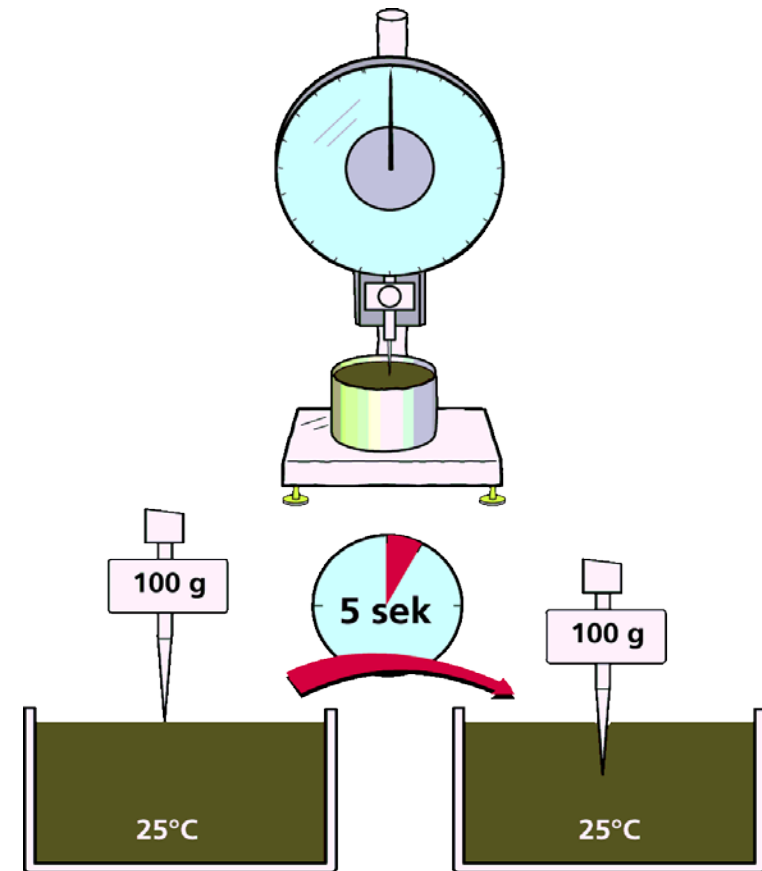
# Ingångsmaterial

## - exempel bitumen



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- Klassificeras efter penetration vid 25°C enligt EN-standard
- Penetration är ett mått på bitumenets hårdhet
- Lägre penetrationsvärde innebär hårdare bitumen
- Råoljeursprung påverkar bitumenets fysikaliska egenskaper
- Framställs genom destillation eller oxidering



Exempel: 70/100  
160/220

# Teoretiska begränsningar



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- Asfalt och obundna materials mekaniska egenskaper avviker från de idealiserade beteenden som modelleras inom klassisk kontinuumsmekanik, t.ex:
  - Kompositmaterial: heterogenitet och anisotropi
  - Asfaltmaterial uppvisar närmast viskoelastoplastiskt beteende
  - Obundna material påverkas av bl.a. spänningstillstånd
  - Klimatfaktorer spelar stor roll: *vatten, temperatur*
  - Materialegenskaperna beror i hög grad på utförande: dvs *hantverket*
  - Vägar bryts successivt ned under trafik- och miljöbelastning
  - Många nedbrytningsmekanismer samverkar
- Detta har inneburit att avsevärda förenklingar normalt görs rörande både beräkningar och karaktärisering av material
  - Nedbrytningsmekanismer beaktas var och en för sig
  - Empirisk korrelering mot fältförhållanden viktig



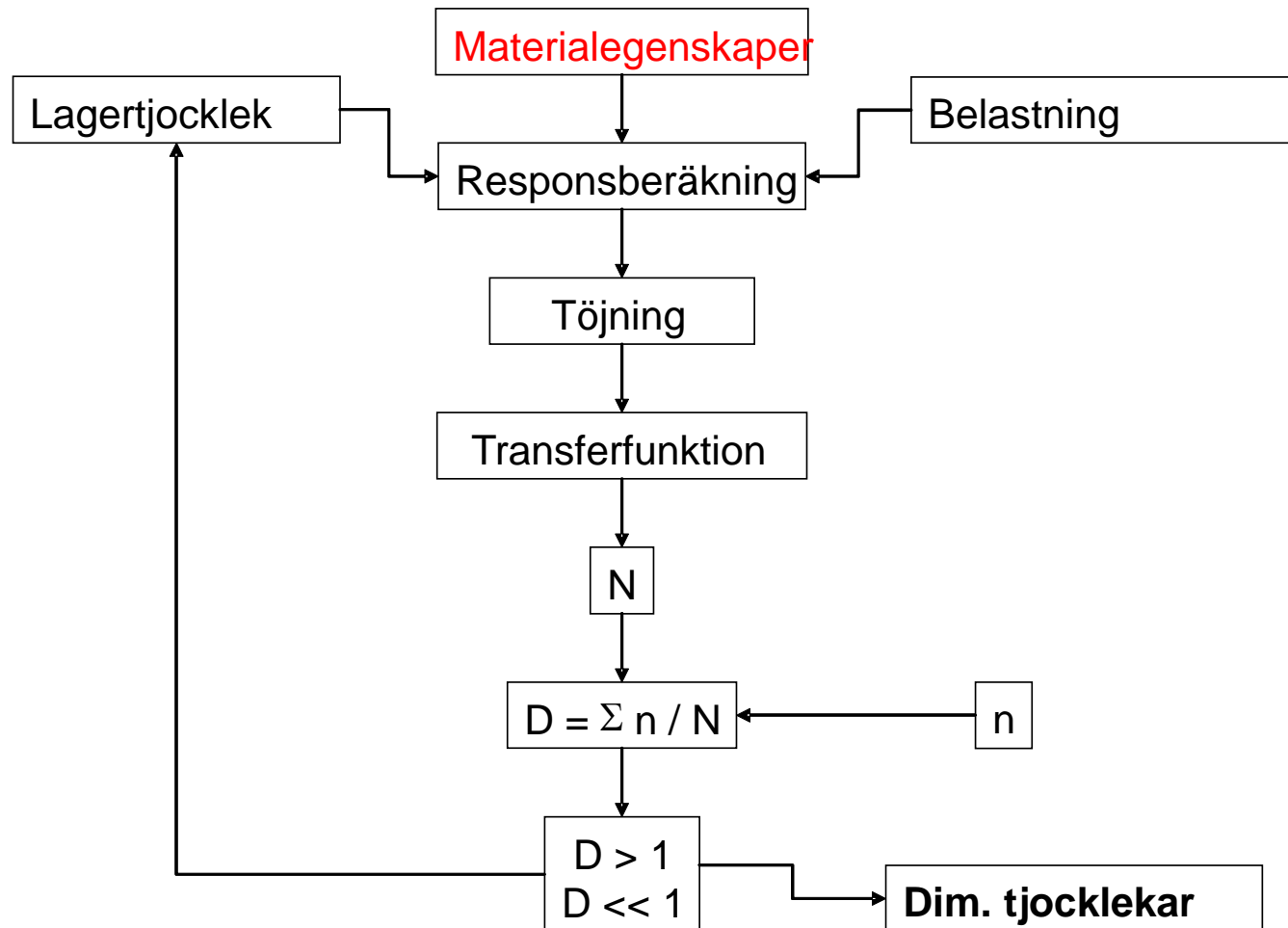
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

### 3. Material och nedbrytning vid praktisk dimensionering

# Mekaniskt-empirisk dimensioneringsmetodik



ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY



# Exempel på dimensioneringsprogram

Name	Type	Dynamic loading	Non-linearity	Visco-elasticity	Anisotropy	Climatic effects	Thermal effects	Fatigue	Permanent deformation
APAS-WIN	ML					Y	Y	Y	
BISAR/SPDM	ML					Y		Y	Y
CIRCLY	ML				Y			Y	
CAPA-3D	FEM	Y	Y	Y	Y		Y	Y	Y
CESAR	FEM	Y	Y	Y	Y	Y		Y	Y
ELSYM 5	ML								
KENLAYER	ML	Y	Y	Y				Y	Y
MICHPAVE	FEM		Y					Y	
VEROAD	ML			Y					
VESYS	ML					Y		Y	Y
PMS Object	ML					Y	Y	Y	Y
NOAH	ML				Y	Y		Y	Y

# PMS Objekt



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- Trafikverkets dimensioneringsprogram
- Integrerat:
  - Trafikmodell
  - Klimatmodell
  - Materialmodell
  - Beräkning, lagrad linjärelastisk
  - Skademodeller
- Definierade materialegenskaper och konstruktionstyper



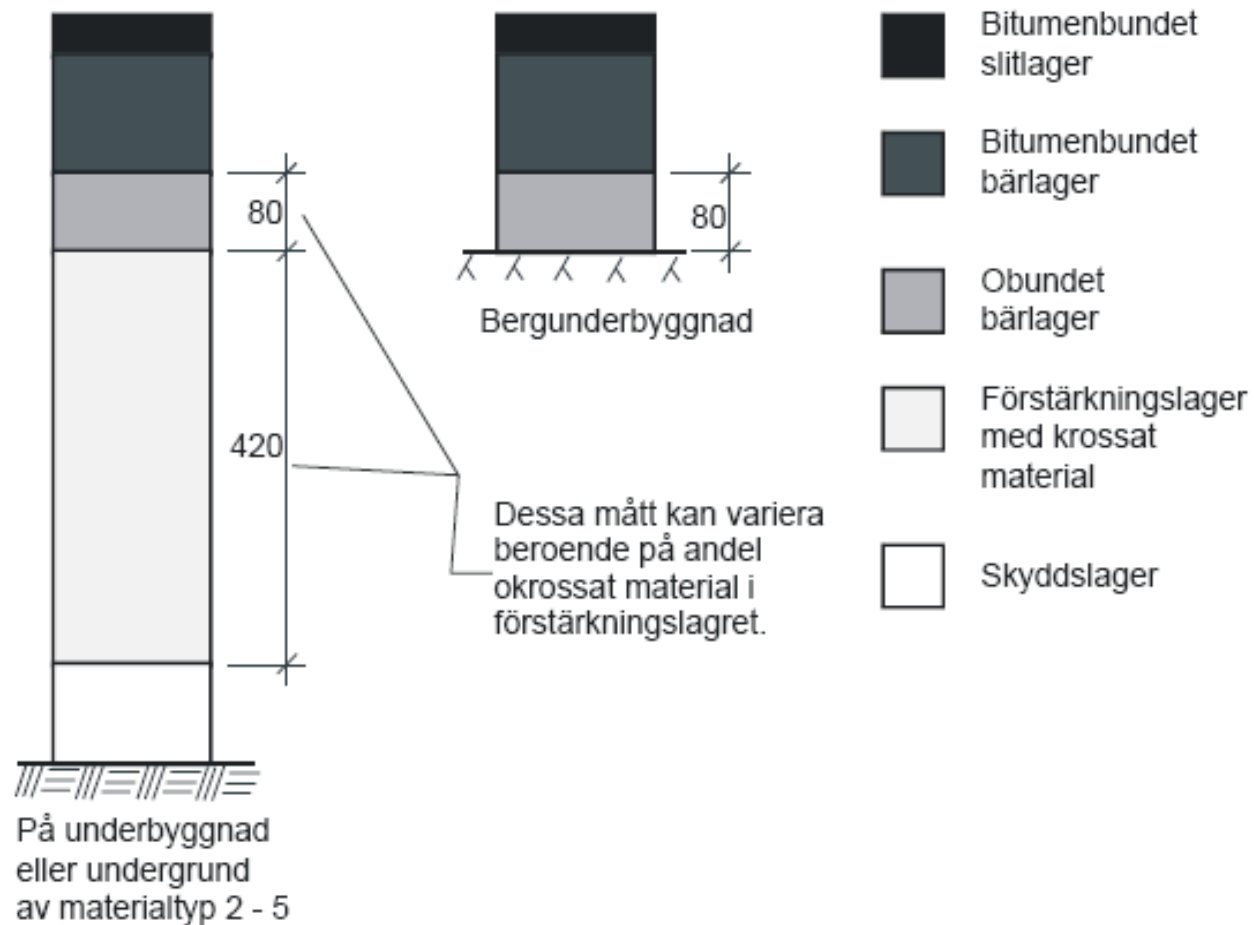
# Definerade konstruktionstyper

- **GBÖ** Grusbitumenöverbyggnad Vanlig på lågtrafikerade vägar
- **GBÖb** GBÖ med bindlager Vanlig på högtrafikerade vägar
- **BBÖ** Bergbitumenöverbyggnad Relativt ovanlig
- **CBÖ** Cementbitumenöverbyggnad Mycket ovanlig
- **BÖ** Betongöverbyggnad Mycket ovanlig
- **GÖ** Grusöverbyggnad Vanlig på lågtrafikerat vägnät

# Exempel: GBÖ



ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY



# Befintlig undergrund –terrastyper 1-5



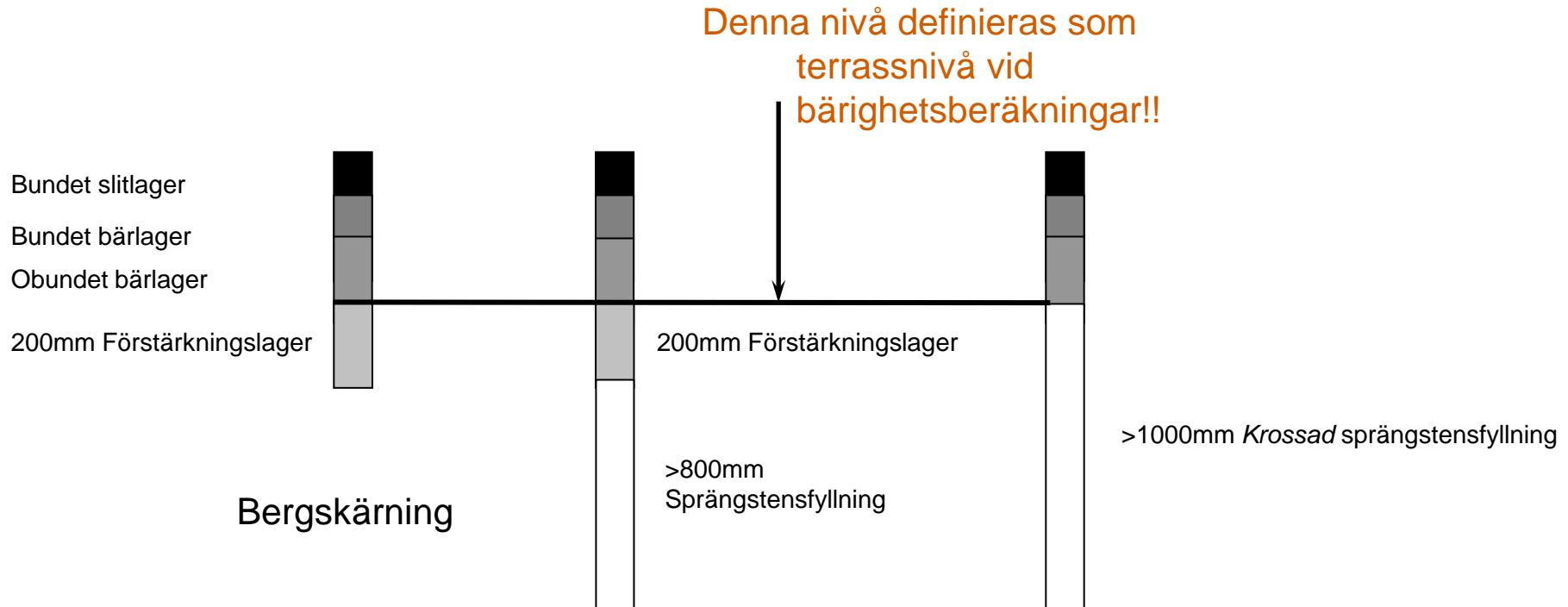
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- 1 Berg
- 2 Grovkornig jord
- 3 Bergtyp3/blandkornig jord  $\leq 30\%$
- 4 Blandkornig jord  $> 30\%$ /lera
- 5 Silt

# Befintlig undergrund – bergterrass typ 1a-c



ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY



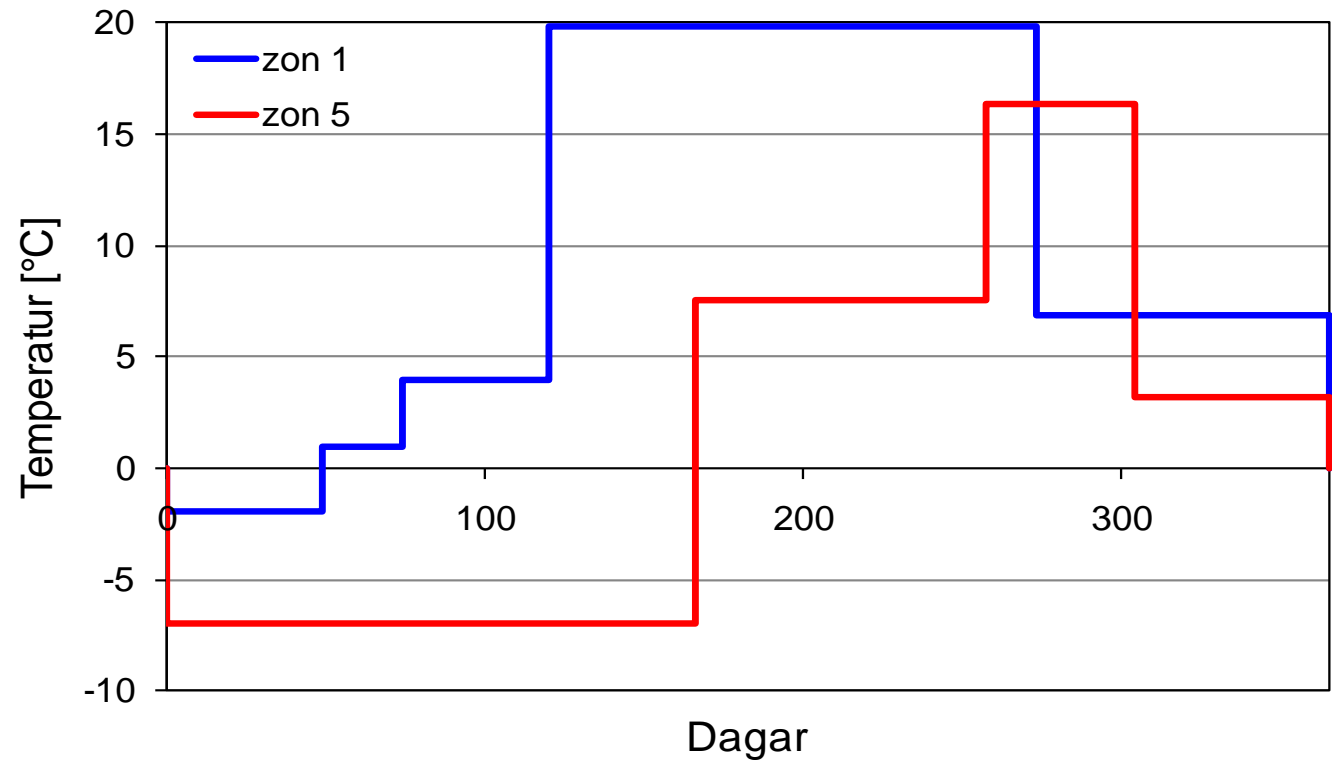
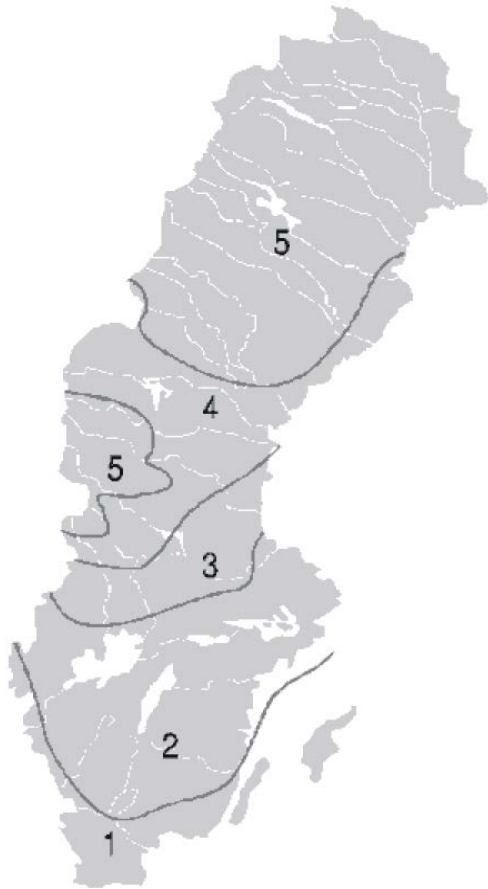
# Klimatmodell



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- 5 klimatzoner
- 6 säsonger
  - Vinter
  - Tjällossningsvinter
  - Tjällossning
  - Senvår
  - Sommar
  - Höst
- Längd och beläggningstemperatur påverkas
- Obundna lager och terrassens egenskaper

# Klimatzoner



# Materialmodeller

**Tabell C4-14 Styvhetsmoduler,  $M_s$ , (MPa) för material i underbyggnad och undergrund**

	Materialtyp			
	2	3	4	5
Vinter	1000	1000	1000	1000
Tjällossningsvinter	1000	1000	1000	1000
Tjällossning	70	35	30	10
Senvår	85	50	40	20
Sommar	100	100	50	45
Höst	100	100	50	45

# Materialmodeller

## Bitumenbunden beläggning, nybyggnad

Tabell C4-1 Styvhetsmoduler,  $M_s$ , (MPa) för bitumenbundet slitlager, typ MAB.

Tjocklek < 50 mm	Klimatzon				
	1	2	3	4	5
Vinter	14500	14500	15500	17000	18500
Tjällossningsvinter	13000	13000			
Tjällossning	13000	12000	10500	9500	9000
Senvår	11000	11500			
Sommar	3500	4000	4500	4000	4500
Höst	9000	11000	11000	11000	11500



# Materialmodeller

**Tabell C4-2 Styvhetsmoduler,  $M_s$ , (MPa) för bitumenbundet bärlager, typ AG, tjocklek mindre än 100 mm.**

Tjocklek 0 - 100 mm	Klimatzon				
	1	2	3	4	5
Vinter	12500	12500	13500	14500	16500
Tjällossningsvinter	10500	10500			
Tjällossning	10500	10000	8500	7500	7000
Senvår	9000	9500			
Sommar	2500	3000	3500	3000	3500
Höst	7500	9000	9000	9000	9000

# Materialmodeller

**Tabell C4-3 Styvhetsmoduler,  $M_s$ , (MPa) för bitumenbundet bärlager, typ AG tjocklek  $\geq 100$  mm.**

Tjocklek $\geq 100$ mm	Klimatzon				
	1	2	3	4	5
Vinter	11500	11500	12500	13500	15000
Tjällossningsvinter	10000	10000			
Tjällossning	10000	9000	8000	6500	6000
Senvår	8000	8500			
Sommar	2000	2500	3000	2500	3000
Höst	6500	8000	8000	8000	8500

# Materialmodeller

## Obundna lager, nybyggnad

Tabell C4-7 Styvhetsmoduler,  $M_s$ , (MPa) för obundna överbyggnadsmaterial

	Bärlager	Förstärkningslager		Skyddslager
		Okrossat	Krossat	
Vinter	1000	1000	450	1000
Tjällossningsvinter	150	1000	450	1000
Tjällossning	300	160	450	70
Senvår	450	240	450	85
Sommar	450	240	450	100
Höst	450	240	450	100

# Skademodeller

- **Sprickor: dragtöjning underkant beläggning**

sk. modifierad Kingham

Efter Kingham (1972): baserat på AASHO.

Något justerat under åren till Svenska förhållanden  
bl.a. SAN REMO (Arm, 1992)

$$N_{bb,i} = f_s \frac{2,37 \cdot 10^{-12} \cdot 1,16^{(1,8 \cdot T_i + 32)}}{\epsilon_{bb,i}^4}$$

$$N_{till,bb} = \frac{365}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{bb,i}}}$$

- **Akkumulerade deformationer: trycktöjning terrass**

modifierad SHELL

(även STINA 1976, Samarbetsprojekt för tillämpning i Norden av AASHO-undersökningen)

$$N_{te,i} = f_d \frac{8,06 \cdot 10^{-8}}{\epsilon_{te,i}^4}$$

$$N_{till,te} = \frac{365}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{te,i}}}$$

# Skademodeller



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

$$N_{bb,i} = f_s \frac{2,37 \cdot 10^{-12} \cdot 1,16^{(1,8 \cdot T_i + 32)}}{\varepsilon_{bb,i}^4}$$
$$N_{te,i} = f_d \frac{8,06 \cdot 10^{-8}}{\varepsilon_{te,i}^4}$$

# Tjäle

- Baserat på Åke Hermanssons modell:  
*Modeling of frost heave and surface temperatures in roads, 2002*
- Finns i PMS Objekt
- Använder historisk klimatdata

Lagerföljd

Du kan använda typ 1 - 11 för att få standardmaterial enligt väg 94. Vill du definiera eget material eller ändra fukthalten måste du använda de röda eller de gröna fälten

Använd röda eller gröna fält för att definiera respektive skikt

Värmeledningsförmåga

skikt	Typ	Tjocklek (m)	Ner till (m)	Vattenkvot	Torrdensitet	Porositet	Mättnad	o-fuset	fruset
skikt 1	1 Bituminöst slitlager	0.04	0.04	0.01	2200	0.16	0.13	2.5	2.5
skikt 2	3 Bitumenbundet bärl o bir	0.19	0.23	0.01	2200	0.16	0.13	2.5	2.5
skikt 3	5 Obundet bärlager	0.08	0.31	0.05	2000	0.24	0.41	1.6	1.42
skikt 4	6 Förstärkningslager	0.69	1	0.05	2000	0.24	0.41	1.6	1.42
skikt 5	9 terrassmtrl tjfkl 1	5	6	0.13	1900	0.28	0.88	1.8	2.43
skikt 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
skikt 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
skikt 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
skikt 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
skikt 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Maximal lyfthastighet (mm/dag) Ca 0 - 2 0,5 2

Tjälfarligt material på nivå (m) 1 10

Beräkna Välj klimatfil Läs markdata Spara markdata Avsluta

Rapportdjup (mm) 20 70 120 150 200

# Material och nedbrytningsmekanismer

## - slutsatser



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

- Modellering av vägar kan göras med analytiska strukturmodeller där materialegenskaper ingår
- Det finns ett antal materialmodeller som kan användas för att idealisera beteenden

Men...

- Vägbyggnadsmaterial är var och en för sig komplexa jämfört med idealiseringar i kontinuumsmekaniken
- Dimensionering förutsätter successiv nedbrytning - ytterligare komplexitet
- Väsentliga förenklingar nödvändiga i praktiken

Slut



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY