

Thesis 232

Vägens strukturella tillståndsförändring vid igensättningsförsök

Bärighetsutredning med hänsyn till uppmätt
fallviktsdata och fukthalt från Lv126
Torpsbruk

Fernando Cruz del Aguila
Madeleine Direnius

Trafik och Väg
Institutionen för Teknik och Samhälle
Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet

Thesis / Lunds Tekniska Högskola
Institutionen för Teknik och samhälle,
Trafik och väg, 232

ISSN 1653-1922

Fernando Cruz del Aguila & Madeleine Direnius

Vägens strukturella tillståndsförändring vid igensättningsförsök - Bärighetsutredning med hänsyn till uppmätt fallviktsdata och fukthalt från Lv 126 Torpsbruk

2012

Ämnesord:

Fallviktsdeflektometer (FWD), fukthalt, deflektionsindex, elastisk flerlagersteori, bakåtkräkning, EVERCALC, igensättning, fukthaltsmodell, TDR.

Referat:

Lv 126 utanför Torpsbruk har under en tid haft bärighetsproblem som bland annat har lett till en snabb uppkomst av spårbildning. Problemet har troligtvis berott på höga fukthalter i väggroppen. Examensarbetet behandlar en bärighetsutredning med hänsyn till uppmätta fukthalter på en vägsträcka av Lv126. Utifrån de uppmätta värdena analyseras vägens styvhet i relation till fukthalten. Detta för att få en förståelse av hur vatten påverkar vägens strukturella tillstånd.

English title:

Pavement Behaviour Evaluation during high Moisture Contents – A clogging study using FWDs on county road 126 Torpsbruk.

Citeringsanvisning:

Fernando Cruz del Aguila & Madeleine Direnius, Vägens strukturella tillståndsförändring vid igensättningsförsök – Bärighetsutredning med hänsyn till uppmätt fallviktsdata och fukthalt från Lv 126 Torpsbruk. Lund, Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för Teknik och Samhälle. Trafik och Väg 2012. Thesis. 232

Trafik och väg
Institutionen för Teknik och samhälle
Lunds Tekniska Högskola, LTH
Lunds Universitet
Box 118, 221 00 LUND

Traffic and Roads
Department of Technology and Society
Faculty of Engineering, LTH
Lund University
Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

Förord

Detta examensarbete har utförts på LTH, Lunds Tekniska Högskola, under våren och sommaren 2012. Ämnet som examensarbetet behandlar har varit väldigt intressant och lärorikt att arbeta med och vi är tacksamma att VTI gav oss möjligheten att göra detta.

Vi skulle vilja tacka de personer som har hjälpt oss under detta examensarbete:

Sigurdur Erlingsson – för hans handledning, engagemang och värdefulla kommentarer som handledare.

Ebrahim Parhamifar – för hans goda råd, synpunkter och kommentarer som examinator.

Farhad Salour – för hans hjälp och för de goda råd vi fått under arbetets gång.

Våra familjer – som stöttat oss under arbetets gång.

Lund, augusti 2012

.....

Madeleine Direnius

.....

Fernando Cruz del Aguila

Arbetsfördelning: Litteraturstudien och resultatdelen samt slutsatserna och diskussionerna gjordes tillsammans. Utvärdering och sammanställning av mätdata gjordes till största del av Madeleine och den största delen av teorin gjordes av Fernando.

Sammanfattning

När en väg utsätts för hög grundvattennivå och höga fukthalter minskar bärförmågan i de obundna lagren betydligt. Detta leder till deformationer i väggkroppen som i sin tur visar sig som sprickor och spårbildning på vägens yta. För att utvärdera styvhetsförlusten under förhöjda fukthalter kan fallviktsmätningar utföras. Utifrån fallviktsmätningens uppmätta deflektioner kan antingen ett bakåtberäkningsprogram, eller en enklare metod baserat på deflektionsindex användas för att utvärdera styvheten. Detta examensarbete baseras på fallviktsmätningar och fukthaltsmätningar som är gjorda på Länsväg 126 utanför Torpsbruk i Småland under sommaren 2011. Syftet med examensarbetet var att utvärdera styvhetsförlusten under höga fukthalter. För att kunna göra denna utvärdering stängdes dräneringen av på en delsträcka av Lv 126 under tre månader. Detta för att få ökade fukthalter i väggkroppen. Genom att använda både bakåtberäkningsprogram och deflektionsindex kunde en jämförelse av de båda resultaten göras. Bakåtberäkningarna tydde på att bärlager/förstärkningslager och terrass förlorade 38 % respektive 35 % av styvheten under höga fukthalter. Deflektionsindexen för båda lagren stämde relativt bra ihop med de bakåtberäknade styvheterna, då båda analyserna tydde på minskad styvhet under höga fukthalter.

Nyckelord: Fallviktsdeflektometer (FWD), fukthalt, deflektionsindex, elastisk flerlagersteori, bakåtberäkning, EVERCALC, igensättning, fukthaltsmodell, TDR.

Summary

When a road is exposed to high water table and high moisture contents, the bearing capacity in the unbound layers will decrease considerably. Cracks and rutting will appear in the road surface, as a result of deformations further down in the pavement. Falling Weight Deflectometer (FWD) measurements can be made in order to evaluate the loss in bearing capacity during high moisture contents. To evaluate how the stiffness varies in the road, the measurements from the FWD can be used either in a backcalculation program, or in a simpler method based on deflection basin indices. This master thesis is based on data from FWD's and moisture content measurements, obtained from a selected part of the county road Lv 126 near Torpsbruk in Småland province, Sweden during the summer 2011. The aim of this master thesis was to evaluate the loss in stiffness caused by increased moisture content. In order to achieve higher moisture content in the pavement, a part of the draining system in Lv 126, was clogged during three months. By applying both backcalculation programs and deflection basin indices, a comparison of these two results could be made. The results from the backcalculation showed a loss of stiffness in the base course/subbase and the subgrade in an order of 38 % and 35 % respectively during the clogged period. In accord to the backcalculated stiffness, the deflection basin indices results also indicated decreasing stiffness during high moisture contents.

Keywords: Falling Weight Deflectometer, moisture content, deflection basin indices, multilayer elastic theory, backcalculation, EVERCALC, clogging, moisture model, TDR.

Förkortningar

| | |
|--------|--|
| ABT | Tät asfaltbetong |
| BDI | Base Damage Index |
| BCI | Base Curvature Index |
| CCP | Konstant omgivningstryck (Constant Confining Pressure) |
| ES1 | EnviroSmart1 (EnviroScan) |
| FWD | Fallviktsdeflektometer |
| GBÖ | Grusbitumenöverbyggnad |
| GPR | Ground Penetrating Radar |
| HWD | Tung fallviktsdeflektometer (Heavy Weight Deflectometer) |
| Lv | Länsväg |
| LFWD | Lätt fallviktsdeflektometer (Light Falling Weight Deflectometer) |
| MET | Ekvivalent Tjockleks Metod |
| MR | Fukthaltsmodell (Moisture Model) |
| NDT | Oförstörande mätmetod (Non Destructive Testing) |
| NMR | Nuclear Magnetic Resonance |
| RMS | Kvadratisk medelvärde |
| SCI | Surface Curvature Index |
| SGU | Sveriges geologiska undersökning |
| TDR | Time Domain Reflectometry |
| VTI | Statens Väg- och Transportforskningsinstitut |
| WESLEA | Waterways Experiment Station, U. S Army Corps of Engineers |
| WSDOT | Washington State Department of Transportation |
| ÅDT | Årsmedeldygnstrafik |

Förteckningslista

| | |
|-----------------|---|
| A | Godtycklig punkt som används som referens i ett medium |
| A_i | Integrationskonstant för det i:e lagret |
| a_m | Minimala värdet av $\log(M_R/M_{R_{opt}})$ |
| a | radien av en cirkulär belastad area [m] |
| B | Godtycklig punkt som används som referens i ett medium |
| B_i | Integrationskonstant för det i:e lagret |
| b | Maximala värdet av $\log(M_R/M_{R_{opt}})$ |
| C_i | Integrationskonstant för det i:e lagret |
| c | Konstant med värde 0,065 |
| D_i | Integrationskonstant för det i:e lagret |
| d_{bi} | Beräknade deflektionen vid sensor i [μm] |
| d_{ui} | Uppmätta deflektionen vid sensor i [μm] |
| E | Styvhet [MPa] |
| E_i | Styvhet på lager i [MPa] |
| E_T | Styvhet för asfalt vid Temperaturen T [MPa] |
| $E_{T_{ref}}$ | Styvhet för asfalt vid referenstemperatur 10 °C [MPa] |
| e | Porhalt |
| F_i | Exponentiell parameter för en cirkulär belastad area |
| F_w | Dimensionslös deflektionsfaktor för ett tvålayerssystem |
| f | Odemarks korrektionsfaktor |
| G | Skjuvmodulen för det elastiska mediumet [MPa] |
| G_s | Specifik densitet (specifik vikt) |
| H | Avstånd från yta till översta gräns för understa lagret [m] |
| h_i | Tjocklek på det i:e lagret [m] |
| h_e | Odemarks ekvivalenta tjocklek på ett lager [m] |
| J_0 | Besselfunktion av första slaget och ordning 0. |
| k_1, k_2, k_3 | Regressionskonstanter som erhålls från en justering av den resilienta modulen vid triaxialt försök. |

| | |
|---------------|---|
| k_s | Regressionsparameter |
| M_R | Elasticitetsmodul ("Resilient" modul) [MPa] |
| M_{Ri} | Elasticitetsmodul för i:e lagret [MPa] |
| $M_{R_{opt}}$ | Referensvärde för Elasticitetsmodul [MPa] |
| m | Parameter med positiva värden för ett flerlayersystem |
| m_s | Massa solida partiklar [kg] |
| m_w | Massa vatten [kg] |
| n | Porositet |
| n_d | Antalet sensorer använt vid bakåtberäkning |
| P | Punktlast [N] |
| p | Uniform last på en cirkulär platta [MPa] |
| p_a | Normaliserad spänning (atmosfärtryck) [MPa] |
| q | Jämnt fördelad last, axialsymmetrisk last [N/m] |
| R_i | Exponentiell parameter för en cirkulär belastad area |
| r | Radiellt avstånd [m] |
| S | Vattenmättnadsgrad |
| S_{opt} | Optimal vattenmättnadsgrad |
| u | Förskjutning i radiell riktning [m] |
| V | Total volym [m ³] |
| V_s | Volym solida partiklar [m ³] |
| V_v | Porvolym [m ³] |
| V_w | Volym vatten [m ³] |
| w | Vertikal deflektion under en styv/flexibel platta [m] |
| w_0 | Deflektion på ytan av ett halv-oändligt medium, $z = 0$ [m] |
| z | Vertikalt avstånd [m] |
| z_i | Vertikalt avstånd till det i:e lagret [m] |
| β | $\ln(-\frac{b}{a_m})$ |
| γ_w | Tunghet vatten [kN/m ³] |
| γ_s | Tunghet för det solida materialet [kN/m ³] |

| | |
|-----------------|--|
| γ_{zx} | Horisontell skjuvtöjning i den radiella riktningen |
| ε | Töjning |
| ε_x | Radiell normaltöjning |
| ε_y | Tangentiell normaltöjning |
| ε_z | Vertikal normaltöjning |
| θ | Total volymetrisk spänning ($\sigma_1 + 2\sigma_3$) [MPa] |
| θ_g | Gravimetrisk fukthalt |
| θ_v | Volymetrisk fukthalt |
| λ | Dimensionslöst vertikalt avstånd, z/H |
| ν | Tvärkontraktionstal (Poisson's tal) |
| ρ | Dimensionslöst avstånd r/H |
| ρ_d | Densitet för det solida materialet [kg/m^3] |
| ρ_w | Densitet vatten [kg/m^3] |
| σ | Spänning [MPa] |
| $\sigma_o(r)$ | Medelvärde av flera spänningar för en styv cirkulär platta [MPa] |
| σ_{ri} | Radiell normalspänning i ovkant av gränssnitt i [MPa] |
| σ'_{ri} | Radiell normalspänning i underkant av gränssnitt i [MPa] |
| σ_x | Radiell normalspänning [MPa] |
| σ_y | Tangentiell normalspänning [MPa] |
| σ_z | Vertikal normalspänning [MPa] |
| σ_{zi} | Vertikal normalspänning för lager i [MPa] |
| τ_{oct} | Octahedral skjuvspänning [MPa] |
| τ_{xz} | Skjuvspänning i x-planet i z- riktning ($=\tau_{zx}$) [MPa] |
| τ_{xy} | Skjuvtöjning i x-planet i y- riktning [MPa] |
| φ_{xy} | Skjuvtöjning (vinkelformad) |
| ϕ | Spänningsfunktion |
| ϕ_i | Spänningsfunktion för det i:e lagret |

Innehållsförteckning

| | |
|---|------|
| Förord..... | iv |
| Sammanfattning..... | v |
| Summary..... | vi |
| Förkortningar | viii |
| Förteckningslista..... | ix |
| Innehållsförteckning | xii |
| 1. Inledning..... | 1 |
| 2. Förstudie om vägar och fukt | 3 |
| 2.1 Vägens uppbyggnad | 3 |
| 2.1.1 Flexibel överbyggnad..... | 3 |
| 2.1.2 Styv överbyggnad..... | 4 |
| 2.2 Faktorer som påverkar vägen..... | 5 |
| 2.2.1 Vattnets uppdelning i vägkroppen..... | 5 |
| 2.2.2 Klimatets och trafikens inverkan på vägkonstruktionen | 6 |
| 2.2.3 Vattens inverkan på vägkonstruktionen | 8 |
| 2.3 Mätmetoder..... | 10 |
| 2.3.1 Fallviktsmätning | 10 |
| 2.3.2 Fel i FWD-data..... | 12 |
| 2.3.3 KUAB..... | 12 |
| 2.3.4 Standardaxel | 12 |
| 2.4 Deflektionsindex..... | 14 |
| 2.5 Fukthaltsmätning..... | 15 |
| 2.5.1 TDR..... | 15 |
| 3. Vägkonstruktionens teori..... | 17 |
| 3.1 Vägmaterialens egenskaper | 17 |
| 3.1.1 Elasticitetsmodul..... | 17 |
| 3.1.2 Triaxial modul..... | 18 |
| 3.1.3 Fukthaltsparametrar | 21 |
| 3.2 Klimatets inverkan på styvhet..... | 23 |
| 3.2.1 Styvhetsvariation under året..... | 23 |
| 3.2.2 Temperaturformel | 24 |
| 3.2.3 Fukthaltsmodell..... | 25 |

| | |
|---|----|
| 3.3 Linjärelastisk teori | 28 |
| 3.3.1 Elasticitetsteori | 28 |
| 3.3.2 Flerlayerssystem | 34 |
| 3.4 Bakåtberäkning | 41 |
| 3.4.1 EVERCALC | 42 |
| 4. Torpsbruks testområde..... | 45 |
| 4.1 Beskrivning av platsen | 45 |
| 4.1.1 Igensättningsförsök | 47 |
| 4.2 Mätningar | 47 |
| 5. Resultat | 53 |
| 5.1 Beräkningsgång | 53 |
| 5.2 Vägens bakåtberäknade styvheter..... | 56 |
| 5.3 Deflektionernas förändring | 58 |
| 5.4 Grundvattenytans variation | 60 |
| 5.5 Beräknade deflektionsindex | 62 |
| 5.6 Jämförelse av resultat | 64 |
| 5.6.1 Bakåtberäknad styvhet vs deflektionsindex | 64 |
| 5.6.2 Jämförelse mellan fukthalt och grundvattenyta | 64 |
| 5.6.3 Styvhetsens variation i förhållande till fukthalt | 65 |
| 5.6.4 Fukthaltsmodell..... | 68 |
| 5.6.5 Styvheter som funktion av deflektionsindex | 73 |
| 6. Diskussion och slutsatser..... | 75 |
| Källförteckning..... | 79 |
| Bilaga – Uppmätta deflektioner och RMS..... | 83 |

1. Inledning

Förutom trafikens belastning bryts en väg ständigt ner på grund av klimatets inverkan. En betydande faktor är förekomsten av vatten i vägkonstruktionen och beroende på hur vägen ligger i förhållande till omgivande terräng är den mer eller mindre känslig för vatteninträning (Papagiannakis & Masad, 2008). Enligt Charlier et al. (2009) finns det dessutom en tydlig koppling mellan höga fukthalter och minskad styvhet. Anledningen är att höga fukthalter gör att friktionen mellan kornen minskar. Detta leder i sin tur till minskad styvhet i konstruktionen och större deformationer på vägytan, än om fukthalten varit lägre.

Länsväg 126 utanför Torpsbruk har under flera år haft problem med bland annat snabb uppkomst av spårbildning, vilket troligtvis har berott på höga fukthalter i vägkonstruktionen. Det har tidigare gjorts studier på en del av Länsväg 126 om hur styvheten varierar under tjällossningsperioden och tiden därefter. Slutresultatet visade att vägens styvhet är som allra lägst under tjällossningsperioden.

Precis som förväntat fanns det en tydlig koppling mellan ökad fukthalt och minskad styvhet i vägkonstruktionen. När dräneringen stängdes av ökade fukthalten i väggroppen snabbt och en minskning av styvheten kunde samtidigt konstateras. Både fukthalten och styvheten höll sig relativt konstanta ända fram till dräneringen släpptes på igen. Därefter återgick fukthalten och styvheten till ungefär samma värden som de hade innan igensättningen. Kurvorna till deflektionsindex passade relativt bra ihop med de bakåtberäknade styvheternas kurvor och ger därför en god uppskattning på hur styvheten varierar i konstruktionen. Deflektionsindexen ger dock inte ett exakt värde på styvheten utan snarare en indikation på huruvida styvheten ökar eller minskar.

Syfte

Syftet med denna rapport är att undersöka, med hjälp av fallviktsmätningar, hur vägens bärighet i form av sprickor och spårbildning påverkas av höga fukthalter. Dessutom studeras förhållandet mellan väggroppens styvhetsmoduler, fukthalt och deflektionsindex. Huvudmålet med rapporten är att få en ökad förståelse för hur vägens struktur och beteende ändras under inverkan av höga fukthalter.

Metod

Resultatet i denna rapport bygger på fallviktsmätningar som är gjorda av VTI under sommaren och hösten 2011 på länsväg 126 utanför Torpsbruk. Under delar av den studerade mätperioden har vägens dräneringssystem stängts av för att få en förhöjd grundvattennivå och därmed högre fukthalter i vägkonstruktionen. Detta för att efterlikna de perioder då vägen har utsatts för höga grundvattennivåer på grund av bristfällig avvattning. Med hjälp av deflektionsdata från fallviktsmätningar beräknas elasticitetsmodulen i vägens olika lager med hjälp av bakåtberäkningsprogrammet EVERCALC 5.0. Under hela perioden mäts även fukthalten på olika djup i vägkonstruktionen för att kunna studera sambandet mellan fukthalt och vägens styvhet.

Avgränsningar

Avgränsningarna i denna rapport är att det endast ingår fallviktsdata från en enskild vägsträcka på Lv 126. Detsamma gäller för mätdata över fuktillståndet i väggroppen under mätperioden. Utifrån detta ges endast en bild av vad som händer just för detta vägobjekt relaterat till dess strukturella tillståndsförändring. Ytterligare en begränsning i rapporten är att endast en linjärelastisk modell, som är byggd på elasticitetsteorin, används.

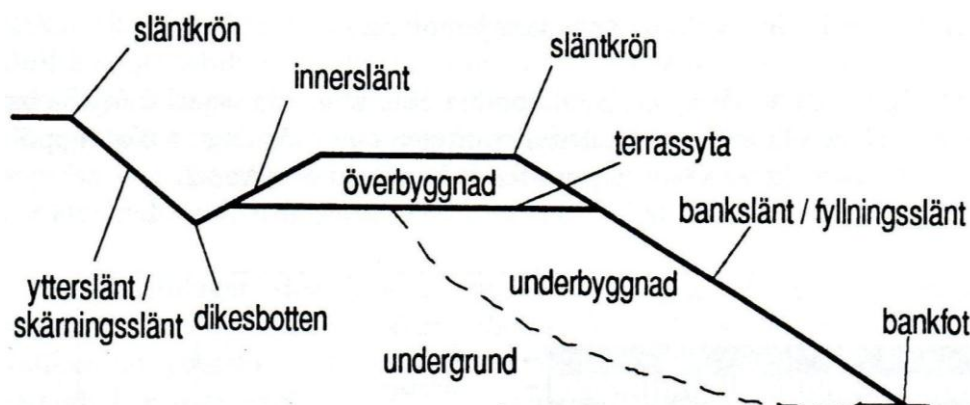
Rapporten är uppdelad i sex kapitel. I *kapitel 2* ges en introduktion om vägens uppbyggnad och hur klimatet påverkar vägens tekniska livslängd. Dessutom innehåller kapitlet grundläggande information om den mätutrustning som har använts i studien. I *Kapitel 3* introduceras den teori som krävs för att förstå hur vattenhalter kan uttryckas och beräknas samt teorin bakom bakåtberäkningar och dess programvaror. I *kapitel 4* ges en beskrivning av platsen och uppmätt data. I *kapitel 5* presenteras de antaganden som gjorts vid beräkningarna och resultat från bakåtberäkningar, deflektionsindex och fukthaltsmätningar samt en jämförelse utav dessa. *Kapitel 6* utgörs av diskussion och slutsatser.

2. Förstudie om vägar och fukt

2.1 Vägens uppbyggnad

Väggroppen är uppdelad i två huvuddelar som brukar benämnas överbyggnad samt underbyggnad. Överbyggnaden har som huvuduppgift att sprida lasten från trafiken ner till underbyggnaden utan att alltför stora deformationer uppstår i väggroppen. Dessutom skall överbyggnaden förbättra undergrundens lastfördelande förmåga och uppfylla de krav som trafiken ställer på säkerhet och komfort, ha en jämn yta samt transportera bort vatten både från väggropp och från vägyta. Underbyggnaden utgörs av den ursprungliga marken och brukar benämnas terrass (Isacsson, 2000). I figur 1 visas alla ingående delar i en väggkonstruktion.

Överbyggnader kan delas in i tre grupper; *flexibla*, *styva* och *halvstyva överbyggnader* (Papagiannakis & Masad, 2008).



Figur 1 - Väggroppens uppbyggnad (Trafikverket, 2011)

2.1.1 Flexibel överbyggnad

En av de vanligare överbyggnadstyperna i Sverige är grusbitumenöverbyggnad (GBÖ) som är av den flexibla sorten. Uppbyggnaden av en GBÖ består av ett bituminöst slitlager, eventuellt ett bitumenbundet bärlager, ett obundet bärlager av krossat material, förstärkningslager och eventuellt ett skyddslager ovanpå terrassen (Trafikverket, 2010a).

Slitlagret är det översta lagret i överbyggnaden och består av en tät asfaltmassa med innehåll av bindemedel, bitumen och ett väl sorterat stenmaterial. Bitumen är en blandning av olika kolväten och framställs genom destillation av råolja (Papagiannakis & Masad, 2008). Slitlagrets primära funktion är att ge körbanan goda egenskaper sett ur trafiksäkerhetssynpunkt och ge god komfort. Det innebär bland annat att ytan ska vara jämn, ha god friktion och kunna motstå deformationer i form av bland annat spårbildning. (Yoder & Witczak, 1975). Dessutom ska vägytan ha god vattenavrinning samt förhindra att vatten tränger in i väggkonstruktionen. (Isacsson, 2000).

Det finns ett flertal bituminösa slitlager att välja mellan och vilken som ska användas i ett specifikt projekt beror till stor del på vilka laster vägen kommer att utsättas för, projektets budget och vilka material som är tillgängliga (Yoder & Witczak, 1975).

Tät Asfaltbetong (ABT) är ett exempel på en varmblandad asfaltmassa som kan användas både till slit-, bind- och bärlager på alla typer av vägar. En ABT kan beskrivas med följande exempel: 92 ABT 11 B160/220

där:

| | |
|---------|---|
| 92 | står för 92kg/m ² av den aktuella massan |
| AB | står för Asfalt Betong |
| T | står för Tät |
| 11 | står för största stenstorleken i massan (mm) |
| B | Bitumen |
| 160/220 | står för penetrationstal hos bindemedlet |

23 kg/m² av asfaltbetong motsvarar en tjocklek på 10mm. (Agardh & Parhamifar, 2011).

Bärlagret har i sin tur uppgiften att fördela trafikens belastningar så att det inte uppstår alltför stora påkänningar eller deformationer i de underliggande lagren. Det obundna bärlagret består utav krossat grus eller sten och kräver noggrann packning för att få goda hållfasthetsegenskaper. Ett bärlager kan även vara bundet och är då stabiliserat med asfalt. För att klara av de laster som vägen utsätts för krävs att materialet i bärlagret har god kvalitet (Yoder & Witczak, 1975).

Förstärkningslagret är den nedersta delen av överbyggnaden och består antingen av krossad sten eller grus, bergkross eller sprängsten. Dess uppgift är att föra belastningarna från bärlagret vidare ner till undergrunden utan att deformera terrassen, dock är inte kvaliteten på förstärkningslagret lika viktigt som för bärlagret (Yoder & Witczak, 1975). Förstärkningslagret fungerar även som ett dräneringslager och ska därför vara vattengenomsläppligt. Både bär- och förstärkningslager ska ha god stabilitet vilket är egenskapen som tillåter en kornsamling att behålla sin bärande förmåga under belastning. Brist på stabilitet leder till oönskade rörelser i materialet och kan ge uppkomst till både sprick- och spårbildning på vägytan (Isacsson, 2000).

I en normal överbyggnad finns inte alltid ett skyddslager utan det läggs till i områden där klimatet är kallt och tjälfarliga material finns i undergrunden, för att minska tjällyftningar. Skyddslager kan även läggas som materialavskiljande lager på finkorniga undergrunder för att förhindra finkornigt material att tränga upp i förstärkningslagret (Trafikverket, 1994).

2.1.2 Styv överbyggnad

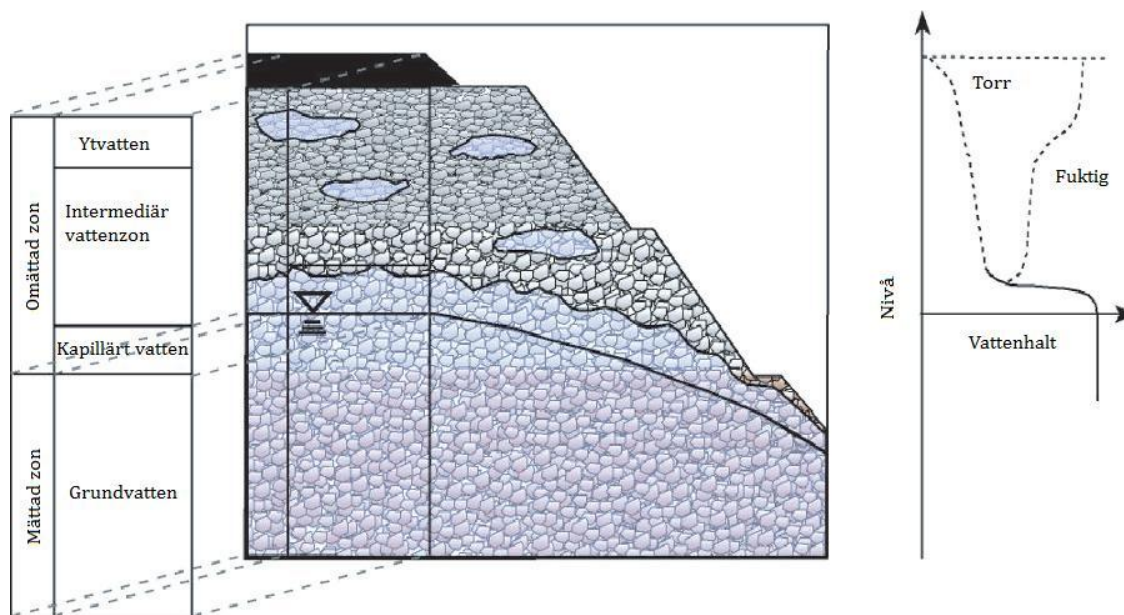
Med styv överbyggnad menas en överbyggnad som har minst ett hydrauliskt bundet lager, där ett exempel är betongöverbyggnad. Styvheten och stabiliteten på en betongöverbyggnad är stor och passar därför till vägar med mycket tung trafik. Eftergivligheten är dock mycket liten och gör därför en sådan konstruktion känslig för rörelser som kan uppkomma från till exempel tjällyftning och sättningar (Trafikverket, 2010b).

2.2 Faktorer som påverkar vägen

2.2.1 Vattnets uppdelning i vägkroppen

Ur vägtekknisk synpunkt är jordarternas hydrodynamiska egenskaper betydelsefulla, vilket förenklat kan beskrivas som att grovheten på jordpartiklarna påverkar markens förhållande till vatten (Svenska Teknologföreningen, 1933).

Vägkroppens innehåll av vatten kan delas in i två zoner; den omättade och den mättade. Se figur 2.



Figur 2 - Illustration över vägens uppbyggnad och vattnets fördelning (Baserad på Erlingsson et al., 2009).

Omättad

Den omättade zonen kännetecknas av att endast delar av porerna är vattenfyllda och att vattenflödet till största del är vertikalt riktat. Den omättade zonen kan i sin tur delas in i ytterligare tre delar; kapillära zonen, intermediära zonen och ytvattenzonen. Den kapillära zonen ligger över grundvattenytan och uppkommer genom att vatten från ytan dras uppåt på grund av ytspänning. Tjockleken på den kapillära zonen kan variera från några centimeter upp till några meter beroende på materialtyp, vilka visas i tabell 1 (Erlingsson et al., 2009).

Vid samma sorteringsgrad, packningsgrad och partikelform är kapillariteten en enkel funktion av kornstorleken, mot vilken den är omvänt proportionell (Svenska Teknologföreningen, 1933). Den intermediära zonen representeras av det vatten som hålls kvar av kapillära krafter och ytvattenzonen är den del som ligger närmast vägytan (Erlingsson et al., 2009).

Tabell 1 - Kapillaritet för olika jordart vid naturliga sediment (Svenska Teknologföreningen, 1933).

| Korngruppsbeteckning | Kornstorleksgränser (mm) | Kapillaritet |
|----------------------------|--------------------------|--------------|
| Grovt grus | 20 - 6 | ---- |
| Fint grus | 6 - 2 | 1 – 5cm |
| Grovsand | 2 - 0,6 | 4 – 15cm |
| Mellansand | 0,6 – 0,2 | 15 – 50cm |
| Grovmo | 0,2 – 0,06 | 40 – 200cm |
| Finmo (Tjällyftande) | 0,06 – 0,02 | 1.5 -6m |
| Mjälajord (Tjällyftande) | 0,02 – c:a 0,006 | 4 – c:a 12m |
| Lättlera (Tjällyftande) | ---- | 8 – c:a 18m |
| Mellanlera | ---- | C:a 15 -? m |
| Styv lera/Mycket styv lera | ---- | ---- |

Mättad

Med den mättade zonen menas den delen av väggroppen som ligger under grundvattenytan och det innebär att alla porer och hålrum är helt vattenfyllda. I den mättade zonen är vattenflödet i princip endast riktat i horisontalled (Erlingsson et al., 2009).

2.2.2 Klimatets och trafikens inverkan på vägkonstruktionen

Förutom belastning från trafik bryts också en väg ständigt ner på grund av klimatets inverkan. Denna ständiga nedbrytning på belagda vägar medför en stor variation av den ursprungliga bärigheten till följd av variationer i elasticitetsmodulerna i väggroppen (Huang, 2012). Klimatet påverkar vägens nedbrytning på flera olika sätt, men två faktorer; temperatur och vatten har extra stor betydelse. Asfaltens elasticitetsmodul påverkas av temperaturförändringar vilket i sin tur orsakar effekter på utmattnings- och deformationsegenskaper. Vid höga temperaturer blir asfalten mjuk och deformationen blir större vid belastning. Detta leder i sin tur till sämre lastfördelning och större belastningar på underliggande lager. Under vintertid styvnar asfalten på grund av låga temperaturer vilket ökar risken för sprickbildning (Papagiannakis och Masad, 2008).

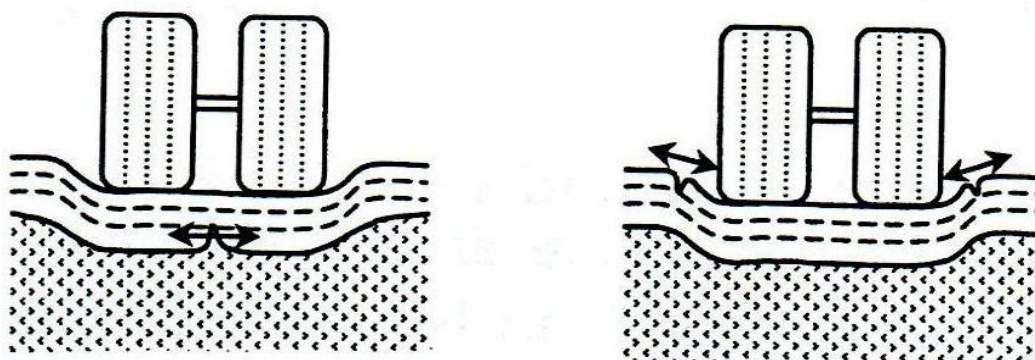
De obundna lagren i överbyggnaden är känsliga för vatteninträngning som gör att stora regnmängder eller högintensivt regn kan ge en svagare vägkonstruktion. Även fryst vatten i marken, så kallad tjäle, kan leda till stora problem i en vägkonstruktion. När isen smälter under våren börjar tjällossningsperioden. Under tjällossningen förlorar vägen en stor del av sin bärighet och gör perioden kritisk för vägkonstruktionen. Genom att hålla vägkonstruktionen torr genom hela året minskar inte bara risken för skador från höga fukthalter utan även risken för skador som uppkommer från tjälen och tjällossningen (Yoder & Witczak, 1975). Ett väl fungerande avvattningssystem fyller därför en avgörande roll i väggroppen (Isacsson, 2000). Nedbrytningen i sig är dock inget som händer plötsligt utan det är en process som sker under relativt lång tid. Vägens tillstånd brukar bedömas bland annat utifrån dess jämnhet i längs- och tvärled, förekomst av sprickor, bärighet och avvattningssystemets kondition (Parhamifar & Agardh, 2011).

Spårbildning uppkommer främst av tre orsaker; slitage från dubbdäck, efterpackning av materialet direkt efter utläggningen eller genom materialomlagring (Papagiannakis & Masad, 2008). Spårbildning som uppkommit på grund av dubbdäcksslitage innebär att endast slitlagret är påverkat. En lämplig åtgärd för en sådan skada kan vara att lägga ett nytt slitlager för att jämna till körbanan (SKF, 2003). Även om spårbildningen uppkommer på vägytan kan det tyda på problem längre ner i vägkonstruktionen eftersom materialomlagringarna kan ske så långt ner som i terrassen (Papagiannakis & Masad, 2008). Dessa problem är vanligt förekommande på platser där tung trafik rör sig långsamt eller står stilla under varma dagar och i kombination med instabila beläggningar är risken för deformationer extra stora (Isacsson, 2000).

Förutom spårbildning kan andra ojämnheter förekomma längs en väg, antingen i längd- eller tvärriktning. En anledning till att en sådan ojämnhet förekommer kan bero på dåliga grundförhållanden som leder till sättningar. En andra anledning skulle kunna vara förändringar av grundvattennivåer i området och en tredje skulle kunna vara ojämna tjällyftningar (Svenska Kommunförbundet, 2003).

En vägyta kan vara utsatt för flera olika sorters sprickor och beroende på deras utseende kan orsaken till dem identifieras. Anledningen till att sprickor i asfalten uppkommer är för att dragtöjningen är större än vad asfalten kan hantera eller på grund av utmattning från upprepade trafiklaster (Papagiannakis & Masad, 2008). Enligt Isacsson (2008) kan en spricka uppkomma på olika sätt. Antingen börjar den i underkant av asfalten och sprider sig uppåt, eller så börjar den i ovankant av asfaltlagret och sprider sig nedåt. Om asfaltlagret ses som en belastad balk kommer det rakt under lasten att bli dragtöjningar i underkant av asfalten. I de fall sprickorna finns i hjulspåren har de därför troligtvis börjat i asfaltens underkant och spridit sig upp till ytan och bildat en genomgående spricka.

I kanten av hjulspåret uppstår dragtöjningar i beläggningens yta vilket kan leda till sprickor som börjar i ovankant och sprider sig nedåt. De genomgående sprickorna innebär att vatten från vägbanan obehindrat kan tränga ner till de undre lagren i vägkonstruktionen (Isacsson, 2000). Figur 3 visar hur sprickorna bildas.



Figur 3 - Bilden till vänster visar sprickbildning från beläggningens underkant. Bilden till höger visar sprickbildning från beläggningens ovankant (Källa: Isacsson, 2000).

Som tidigare beskrivet kan sprickor i vägytan uppkomma av olika anledningar. Så kallade *bärighetssprickor* uppkommer i hjulspår när vägens bärförmåga överskrids. Sprickorna är från början mycket små, men med tiden vidgas de och blir fler och bildar ett sammanlänkat mönster. Mönstren som bildas brukar kallas krackeleringar eller alligatorsprickor på grund av det karakteristiska utseendet (Papagiannakis & Masad, 2008). *Temperatursprickor* uppkommer i asfalten under vinterhalvåret och beror på att asfalten krymper när den kyls ned. När krympspänningarna blir större än asfaltens draghållfasthet uppkommer transversella sprickor på regelbundna avstånd längs med vägen. En annan typ av temperaturrelaterade sprickor kan uppkomma på grund av stora variationer i dygnstemperatur (Papagiannakis & Masad, 2008).

2.2.3 Vattens inverkan på vägkonstruktionen

Alla vägar utsätts mer eller mindre för vatten och detta kan bidra till stora negativa effekter främst för vägens hållfasthet men också för trafikanterns säkerhet och kostnader för drift- och underhåll (Erlingsson et al., 2009). Det finns främst fyra faktorer som bidrar till vattenintag i vägkonstruktionen (Doré & Zubeck, 2009).

- *Kapillär stigning*
- *Lateral vattenöverföring*
- *Infiltration från nederbörd*
- *Frost*

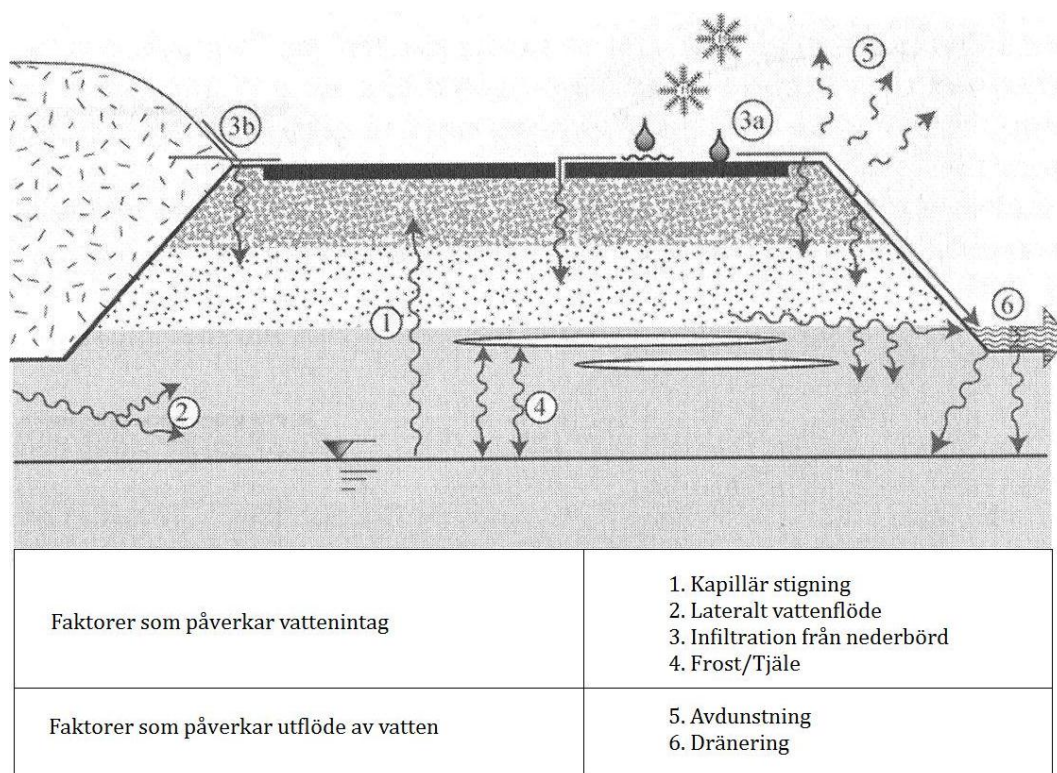
Kapillär stigning innebär att vatten från grundvattenytan stiger med hjälp av kapillära krafter. Hur högt vattnet stiger beror på markens materialegenskaper i form av korn- och porstorlek, se tabell 1. *Lateral vattenöverföring* kan vara ett problem ifall grundvattenytan är högre i omgivande terräng än under vägkroppen, eftersom det då bildas ett grundvattenflöde under vägkroppen. Vatten från *nederbörd* i form av regn eller snö kan infiltreras genom vägens yta via sprickor i asfalten eller tränga in genom vägrenen.

Faktorer som påverkar vägkroppens utflöde av vatten

- *Avdunstning*
- *Dränering*

Hur mycket vatten som *avdunstar* påverkas både av vägens utseende, ifall vägens yta är impermeabel eller inte samt temperaturen. Vägkroppens fukthalt beror dessutom till stor del av hur *dräneringssystemet* ser ut (Doré & Zubeck, 2009). Dräneringssystemet är till för att leda bort vatten från vägkonstruktionen men ifall det är bristfälligt gjort eller dåligt underhållet kan vatten istället ledas in i vägkroppen genom diket (Svensson, 1997). Hur stor påverkan vatten har på en vägkonstruktion beror på flera olika faktorer, t.ex vägens läge i terrängen, vägprofilens utseende och sammansättning av undergrunden. En väg som ligger i skärning och lågt i terrängen påverkas mer av närliggande grund- och ytvatten än en väg som är byggd på högre nivåer (Van Schelt et al., 1994). I Sverige anses de mest kritiska perioderna för vägarnas tillstånd vara under tjällossningsperioden och under regnriska höstar (Svensson, 1997).

Det finns en tydlig koppling mellan ökad fukthalt och minskad styvhet i vägkonstruktioner. Variationer av fukthalt i väggroppen kombinerat med trafik och ändringar i klimat kan leda till en betydande förkortning av vägens livstid. När vatten tränger in i vägkonstruktionen minskar friktionen mellan partiklarna vilket leder till en omplacering i vägmaterialet. När trafik då belastar vägkonstruktionen kommer spårbildning och andra deformationer på ytan att bli större än om fuktigheten varit lägre (Charlier et al., 2009). Figur 4 visar en schematisk bild över hur vatten inverkar på väggroppen.



Figur 4 - Hur vatten inverkar i väggroppen (Baserad på Doré & Zubeck, 2009).

Under 1998 genomfördes tester med accelererad provning i VTI:s provhallar i Linköping för att undersöka deformationsegenskaper i vägkonstruktioner under både torrt och fuktigt tillstånd. Laborationen utfördes genom att bygga upp en testkonstruktion som representerar en vanlig väg och sedan belastar den med trafiklast. Bland annat byggdes och testades en väg med ett asfaltlager på 49 mm, obundet bärlager på 89 mm och sandlager på 2.5 meter (terrass). Laborationen gick ut på att mäta deformationen i vägkonstruktionen i form av spår djup efter ett visst antal pålastningar. Under första delen av testningen låg belastningen på 60 kN och det uppmättes en ökning av spår djup på genomsnitt 0.88 mm per 100 000 pålastningar. I den sista delen av provningen tillsattes vatten i konstruktionen så att vattennivån låg 300 mm under terrassytan och med en belastning på 60 kN kunde en större spår djupsökning konstateras. I genomsnitt blev deformationen med vatten tillsatt i konstruktionen istället 4.16 mm per 100 000 belastningar (Wiman, 2001).

2.3 Mätmetoder

För att kunna utvärdera en vägkonstruktions tillstånd finns två olika slags mätmetoder; förstörande och oförstörande. Den förstörande mätmetoden går ut på att en provkropp tas upp från vägen och sedan undersöks vidare i ett laboratorium, medan den oförstörande mätmetoden görs direkt på plats utan att förstöra vägkonstruktionen. Fördelen med den oförstörande mätmetoden är att den både är billigare och går snabbare att genomföra. Dessa metoder kan bland annat användas till att uppskatta elasticitetsmoduler för de enskilda lagren i en väggkropp, eller för att bestämma konstruktionens maximala tillåtna pålastning (Shahin, 1994).

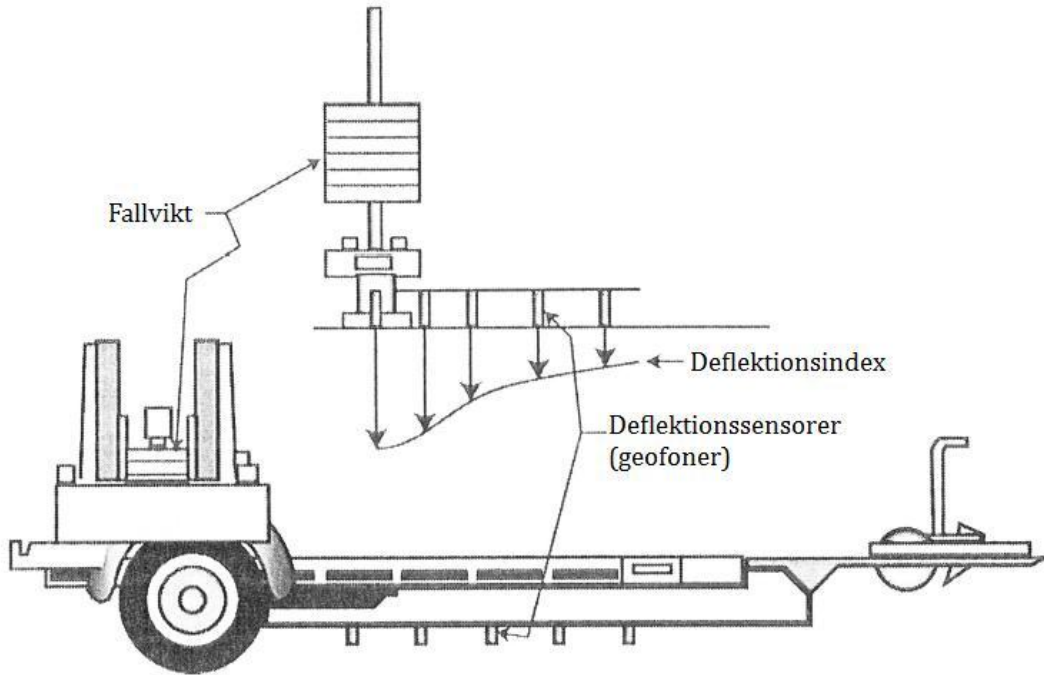
2.3.1 Fallviktsmätning

Fallviktsmätning är ett exempel på en oförstörande mätmetod som baseras på konceptet att släppa en vikt från en känd höjd och på så sätt skapa kinetisk energi (Shahin, 1994). Ett exempel på en vanlig fallviktsutrustning är fallviktsdeflektometer (FWD) (Das & Goel, 2008). Fallviktsmätning är en vanligt förekommande mätning som används på alla vägtyper och går ut på att mäta vägens mekaniska respons under dynamiska laster. De lastpulser som påverkar vägen under provningen ska motsvara den vertikala last som uppkommer när ett tungt fordon kör på vägen i normal hastighet. Fallviktsmätningen görs genom att låta en vikt falla ner på en platta som i sin tur ger uppkomst till en kraftpuls som går ner i vägkonstruktionen. Pulsen som uppkommer vid pålastningen varar i cirka 0.03 sekunder och deflektionen på vägens yta mäts via geofoner som sitter med ökande avstånd från lastplattan (Doré & Zubeck, 2009).

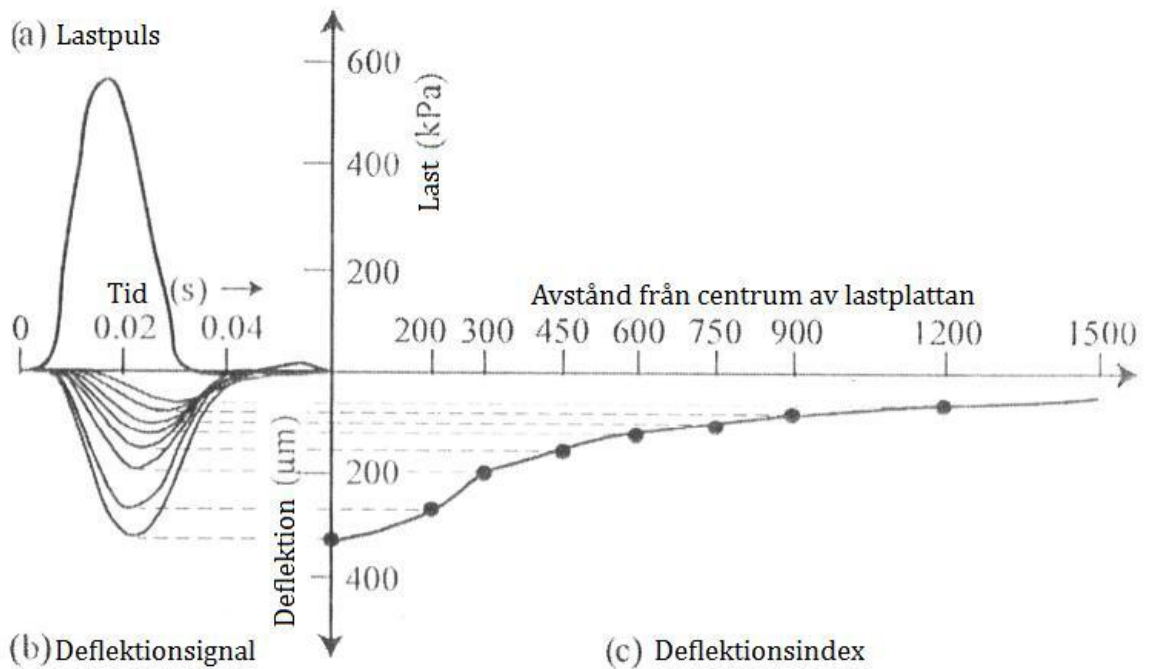
Det finns andra typer av fallviktsutrustningar förutom FWD. Två exempel är lätt fallviktsdeflektometer (LFWD) och tung fallviktsdeflektometer (HWD). Precis som namnen antyder är den förstnämnda en mindre och lättare version, medan den sistnämnda används för att simulera flygplan eller tyngre fordon (Das & Goel, 2008).

Fallviktsutrustningen är oftast monterad på en släpvagn eller på ett testfordon. Deflektionsdatan från fallviktsmätningen kan användas till två olika sorters analyser. Den första analysen utgörs av en enkel beräkning baserat på deflektionsindex och den andra bygger på datorgjorda bakåtberäkningar där en uppskattning av vägkonstruktionens elasticitetsmoduler beräknas (Doré & Zubeck, 2009).

I figur 5 visas en schematisk bild över FWD och i figur 6 visas lastpulsens utseende och vägens respons.



Figur 5 - Schematisk bild av fallviktsutrustning (Baserat på Doré & Zubeck, 2009).



Figur 6 - Lastpuls från fallviktsutrustning och vägkonstruktionens respons (Baserat på Doré & Zubeck, 2009).

2.3.2 Fel i FWD-data

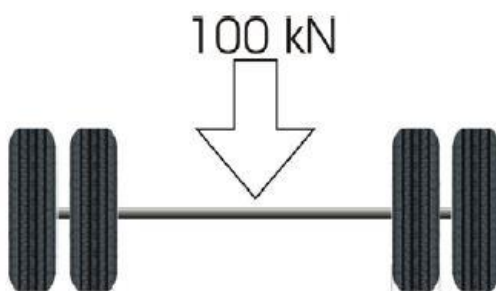
Det finns i huvudsak tre olika fel i FWD data; uppställningsfel, slumpmässiga fel och systematiska fel. Uppställningsfel uppkommer främst på grund av ojämna vägytor eller löst liggande stenar eller fragment. För att undvika dessa fel i mätningarna bör ett par testslag göras i varje mätpunkt innan slutgiltig mätdata samlas in. De slumpmässiga felen har visat sig ligga på cirka $\pm 2 \mu\text{m}$ och antagligen uppkommer dessa fel i överföring av information från analogt till digitalt format. De slumpmässiga felen går inte att få bort helt men genom att göra flera avläsningar och ta medelvärdet av dessa kan felen reduceras. De flesta FWD-utrustningar har en noggrannhet på $\pm 2 \mu\text{m}$ eller $\pm 2 \%$, beroende på vilket värde som är störst. I dessa siffror inkluderas både de systematiska och slumpmässiga felen. Det innebär att när deflektionen är större än $100 \mu\text{m}$ kan det systematiska felet överstiga $2 \mu\text{m}$. Det går att undvika eller att minska de systematiska felen genom att kalibrera FWD-utrustningen (Irwin, 2006).

2.3.3 KUAB

Fallviktsmätningarna som studien på Lv 126 bygger på är gjorda med en fallviktsutrustning vid namn KUAB 50. KUAB utvecklades i Sverige i mitten av 1970-talet med intention att förbättra mätutrustningen som fanns på den tiden. Sedan dess har den lanserats både på forskningsinstitut och på laboratorier världen över. KUAB 50 är den minsta av modellerna och har en lastkapacitet på 13-62 kN (Engineering & Research International Inc, 2010). I figur 8 visas en fallviktsutrustning av märke KUAB. I figur 9 visas en närbild på fallviktsplattan.

2.3.4 Standardaxel

Vid beräkning av vägens tekniska livslängd används ekvivalent standardaxel och definieras enligt figur 7. Lasten är jämt fördelad och motsvarar 50 kN på vardera hjulparet (Trafikverket, 2011). Av denna anledning används ofta 50 kN som last vid fallviktsmätningar.



Figur 7 - Standardaxel (Baserad på Trafikverket, 2011).



Figur 8 - KUAB fallviktsutrustning från VTI (Salour & Erlingsson, 2012).



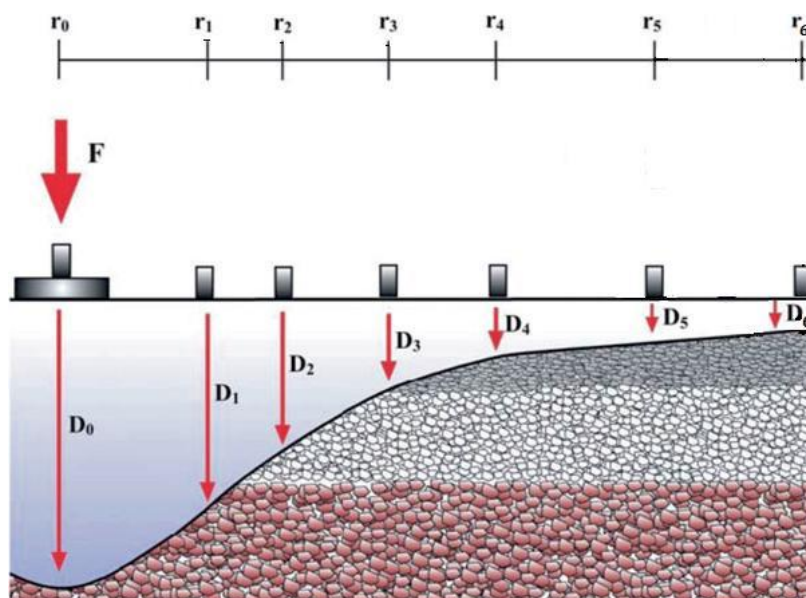
Figur 9 - Närbild på fallviktsplatta (SKF, 2003).

2.4 Deflektionsindex

Från fallviktsmätningar fås vägytans deflektioner och utifrån dessa kan deflektionsindex beräknas. Med hjälp av deflektionsindex kan en indikation för vägens mekaniska beteende fås, se tabell 2. Den första delen av kurvan visar en indikation på styvheten i vägkonstruktionens översta lager (SCI), och den sista delen indikerar styvheten i vägkonstruktionens understa del (BDI) (Doré & Zubeck, 2009). Kurvan för indexen visas i figur 10.

Tabell 2 - Vanliga deflektionsindex för att utvärdera styvhet i vägkonstruktioner (Baserat på Salour & Erlingsson, 2012). Ytterligare information finns i figur 10.

| Deflektionsindex | Formel | Beskrivning |
|-------------------------------|-----------|---|
| D_0 (maximal deflektion) | D_0 | Den maximala deflektionen som uppmätts rakt under lasten. |
| SCI (Surface Curvature Index) | D_0-D_2 | Ger en indikation på styvheten i den övre delen av vägkonstruktionen |
| BCI (Base Curvature Index) | D_2-D_4 | Ger en indikation på styvheten i mellersta delen av vägkonstruktionen |
| BDI (Base Damage Index) | D_4-D_5 | Ger en indikation på styvheten i den undre delen av vägkonstruktionen |



Figur 10 - Deflektionskurva för fallviktsutrustning med 7 sensorer där D_i motsvarar deflektionen och r_i motsvarar det radiella avståndet till lastplattan (Baserat på Cekerevac et al., 2009).

Hur många sensorer som används i fallviktsmätningen kan variera men i den aktuella studien används en fallviktsutrustning med 7 sensorer, med placering som visas i tabell nedan:

Tabell 3 - Sensorernas placering från belastningscentrum.

| Sensor [i] | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Avstånd [mm] | 0 | 200 | 300 | 450 | 600 | 900 | 1200 |

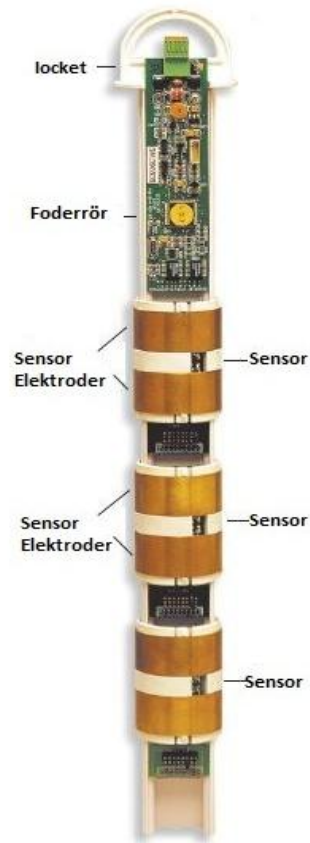
2.5 Fukthaltsmätning

Det finns flera olika metoder för att mäta och bestämma markens vatteninnehåll. Ett sätt att dela in de olika metoderna är i *direkta* och *indirekta* mätmetoder som bygger på vilka mätprinciper som används. Den *direkta* mätmetoden är den enklaste metoden för att mäta vatteninnehållet i en jord. Metoden innebär att ett jordprov grävs upp från den plats som ska undersökas och sedan analyseras på laboratorium. Provet vägs innan och efter torkning och provets gravimetriska vattenhalt är andelen borttorkat vatten i förhållande till provets ursprungliga vikt. De *indirekta* mätmetoderna innebär att mätningar görs på jordens egenskaper, som i sin tur kan relateras till jordens volymetriska vatteninnehåll. Några av metoderna bygger på att sända radioaktiv strålning eller elektromagnetiska pulser genom jorden. Genom att jämföra uppmätta värden med kända värden för torr jord kan därmed det volymetriska vatteninnehållet i den testade jorden bestämmas. En annan metod bygger på att använda mätkroppar som ställer in sig efter rådande tryck i omkringliggande jord och sedan räkna om de uppmätta värdena till ett volymetriskt vatteninnehåll i jorden.

Exempel på olika *indirekta* mätmetoder och utrustningar är TDR (Time Domain Reflectometry), isotopmätare, NMR (Nuclear Magnetic Resonance), GPR (Ground Penetrating Radar), resistansmätare och tensiometer (Svensson, 1997).

2.5.1 TDR

Det finns olika sorters utrustningar för att mäta hur fukthalt varierar i en vägkonstruktion och EnviroSMARTTM, utvecklad av Sentek, är ett exempel på en sådan. Denna typ av mätinstrument använder en princip som bygger på TDR och visas i figur 11 nedan. Tekniken baseras på kontinuerlig mätning av den volymetriska fukthalten i väggroppen genom elektromagnetiska vågor. Mätningen går till genom att pulser av höga frekvenser sänds genom jorden via sensorer (Campbell Scientific, 2007).



Figur 11 - Genomsnitt av en EnviroSMART- anordning (Baserad på Campbell Scientific Inc, 2007).

Syftet med att använda TDR utrustningar är att ge en uppfattning på variationen av fukthalten över tid och på olika djup. Sensorerna är monterade i foderrör av plast och metallspolarna som sköter själva mätningen kan placeras på olika djup längs en skena som sänks ner i foderröret. Foderröret är vattentätt både i botten och i toppen (Hansson et al., 2012). Varje sensor sänder ut ett högfrekvent elektriskt fält vilket utbreder sig genom det skyddande röret och in i marken. Tekniken drar nytta av det faktum att hastigheten hos en elektromagnetisk puls som passerar genom ett poröst jordmaterial påverkas av dess vatteninnehåll (Andersson, 2010).

TDR instrument av denna typ tillämpas bäst när kravet på noggrannhet är betydande (± 0.03 volym-%). Dessutom kan sensorerna registrera den volymetriska fukthaltens variationer upp till 99 % beroende på fältkalibrering och inom en radie av 10 cm utanför foderröret. Instrumentet som visas i figur 11 kan användas för att mäta den volymetriska fukthalten på ett djup ner till 2 meter från vägytan och inom ett temperaturintervall på -20 till $+75$ °C. Dessutom kan utrustningen mäta den volymetriska fukthalten inom ett intervall på 0 till 65 % (Campbell Scientific, 2007).

3. Vägkonstruktionens teori

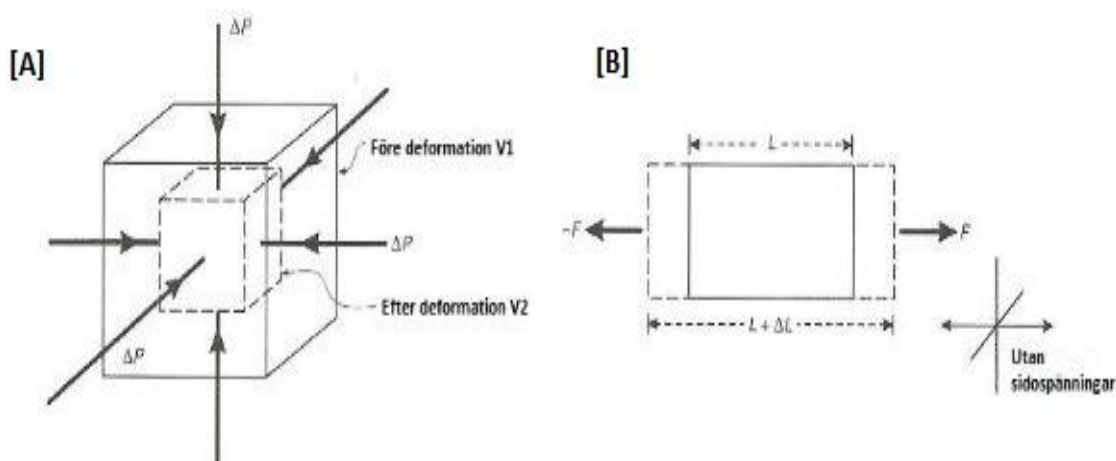
3.1 Vägmateriens egenskaper

3.1.1 Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodulen, E är en materialstorhet som har olika värde beroende på vilket material som studeras. Värdet på elasticitetsmodulen för ett material går att bestämma genom hållfasthetstester i form av tryckprov, dragprov eller böjprov (Burström, 2007).

Strukturellt sett kan en vägkonstruktion ses som en kropp som utsatt för externa krafter F orsakade av trafikbelastningen på vägbanan. Då sådan kraft appliceras på en yta med area A utvecklas krafter i kroppen som i sin tur motsvarar den applicerade kraften. Förhållandet mellan dessa två kända enheter kallas spänning σ och kan delas upp i två komponenter; normalspänning och skjuvspänning (Reynolds, 2011).

Den spända kroppen ger upphov till töjningar ε som är deformationen uttryckt som förhållandet mellan längdändring (eller volym) och den ursprungliga längden (eller volym) (Reynolds, 2011). Förhållandet mellan spänning och töjning ger upphov till elasticitetsmodulen och i figur 12 visas några av de vanligaste typerna av elasticitetsmoduler.

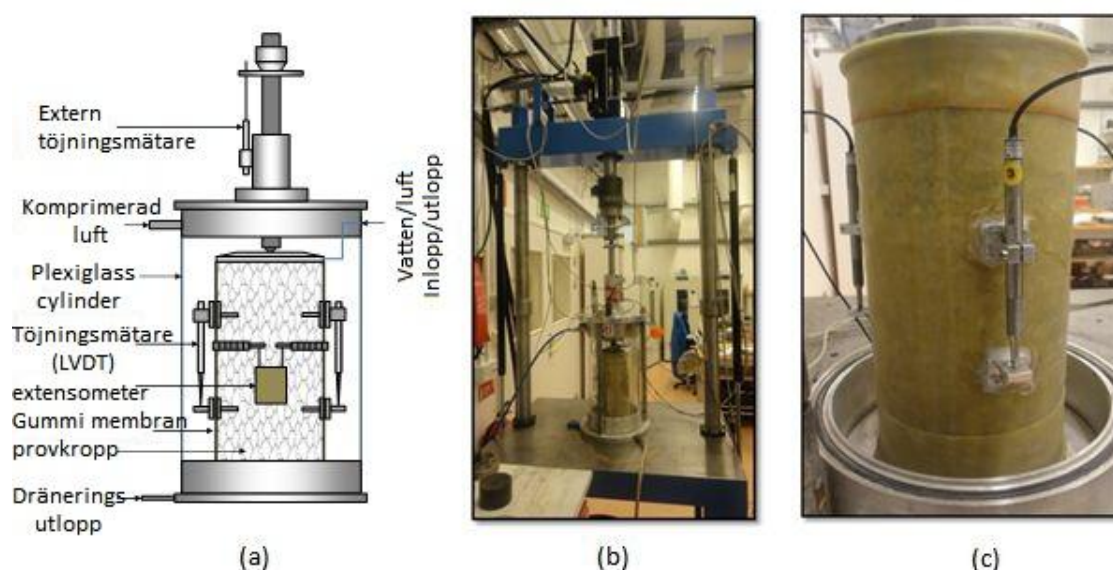


Figur 12 - Elastiska moduler; (A) Tryckmodul (Bulkmodul) och (B) Normal modul. (Baserad på Reynolds, 2011)

3.1.2 Triaxial modul

Den vanligaste parametern för att beskriva styvhetsegenskaperna hos ett obundet material är den resilienta modulen (M_R). Denna parameter kan tas fram genom så kallade triaxiala försök där en provkropp blir utsatt för dynamiska laster (Doré & Zubeck, 2009).

Den resilienta modulen nämndes för första gång av Seed et al. (1960) som den elastiska modulen för ett material, mätt under upprepade laster genom ett triaxialt försök (Andrei D, 2003). Vidare definierar Doré & Zubeck (2009) den resilienta modulen som en representation av ett spänningstillstånd som uppkommer hos obundna material och jordarter i vägkroppen. Syftet med ett triaxialt test är att simulera den belastning som vägen utsätts för som konsekvens av trafiken. I figur 13 syns en bild över en triaxialutrustning.

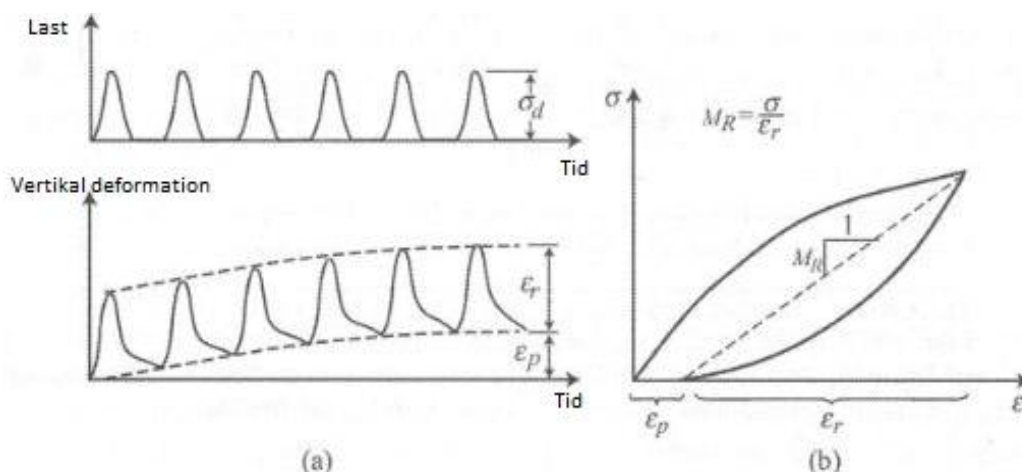


Figur 13 - Triaxial mätutrustning där (a) är en schematisk bild över utrustningen (b) visar utrustningen vid lastramen och (c) visar en triaxial mätutrustning monterad på provkroppen (Rahman & Erlingsson, 2012).

Det triaxiala testet börjar med att en provkropp omsluten med ett membran placeras mellan två lastplattor, där vatten kan flöda fritt genom provkroppens bas. Ett omgivningstryck appliceras i utrustningen genom trycksättning av antingen vatten, olja eller luft. Provkroppen utsätts i nästa steg för axiella dynamiska laster genom en lastkolv som är fastsatt i den övre av de två lastplattorna. Efter ett fördefinierat antal lastcyklar med varierade spänningar mäts den axiella töjningen i provkroppen. Ett genomsnitt av de uppmätta töjningarna ε_r och värdet på spänningen σ_d används sedan för att beräkna M_R enligt ekvation [1] (Doré & Zubeck, 2009).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad [1]$$

Ekvation 1 är en utveckling av Hookes lag för det fall då ett konstant omgivningstryck test (CCP) är applicerat på en provkropp (Andrei D, 2003). Figur 14 visar den del av spänning-töjningskurvan som representerar den resilienta modulen (Doré & Zubeck, 2009).



Figur 14 a) Förutsättningar för lasten vid ett triaxialt försök och b) Förhållandet mellan spänning och töjning i en Resilient Modulus diagram (Doré & Zubeck, 2009).

Doré & Zubeck (2009) påpekar även att den resilienta modulen för obundna material testade som en provkropp, är starkt beroende av spänningsintensiteten som är applicerad på kroppen. Vidare har den konstitutiva ekvationen föreslagits som en del av den mekanisk-empiriska *Pavement Design Guide* och kan uttryckas som (Doré & Zubeck, 2009):

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad [2]$$

Där:

M_R = Resilient modul, MPa

θ = Total volymetrisk spänning ($\sigma_1 + 2\sigma_3$)

τ_{oct} = Octahedral skjuvspänning = $\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$

p_a = Normaliserad spänning (atmosfärtryck)

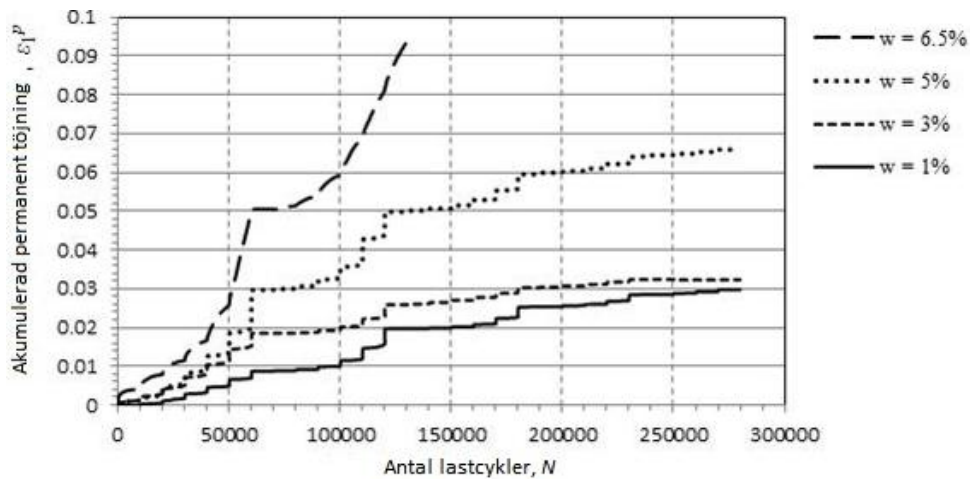
k_1, k_2, k_3 = Regressionskonstanter som erhålls från en justering av den resilienta modulen vid triaxialt försök och den ovan nämnda ekvationen.

En förenkling av det konstitutiva förhållandet i ekvation [2] kan fås utifrån resultaten av ett triaxialt försök och ser ut som följer (Huang, 2012):

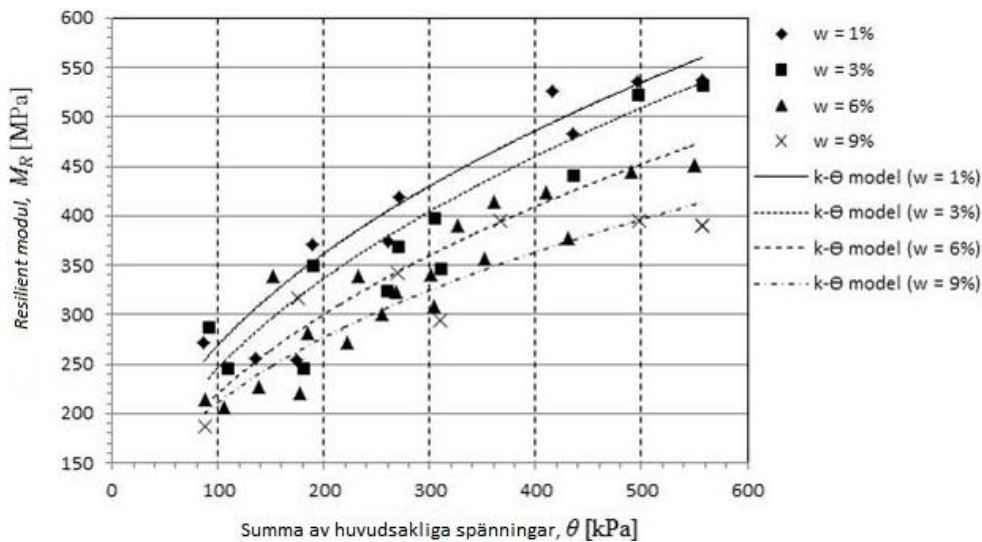
$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \quad [3]$$

I denna ekvation är k_1 beroende av fukthalten vilken kan variera, men den hålls relativt konstant med årstiden. k_2 är förknippad med jordarten (WSDOT, 1995).

Andrei (2003), påpekar att värden på den resilienta modulen hos obundna material såsom vissa bärlager, förstärkningslager och terrasser inte är konstanta. Det icke-linjära sambandet av den resilienta modulen (M_R) gör att dess användning med en elastisk flerlayersanalys blir ett komplext uppdrag. Elasticitetsteorin behandlas vidare i kap 3.3. Däremot kan ett konstant värde på M_R användas för att förenkla situationen och då används en linjärelastisk analys. I Figur 15 och 16 visas att fukthalten spelar stor roll för den permanenta töjningen i ett material samt för den resilienta modulen.



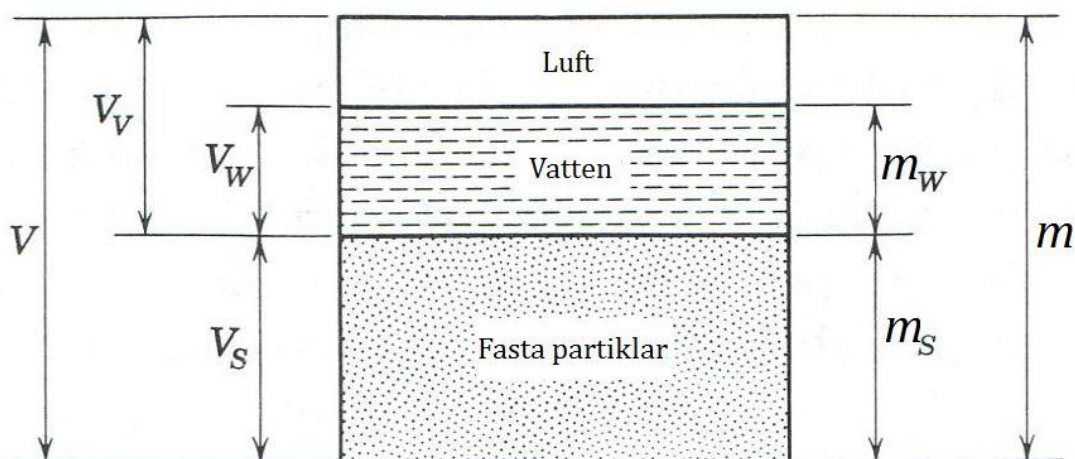
Figur 15 – Kurvorna i diagrammet visar att högre fukthalter ett material leder till högre permanenta töjningar vid ett visst antal lastcykler. (Rahman & Erlingsson, 2012).



Figur 16 – De olika kurvorna i diagrammet visar att högre fukthalter leder till lägre resilienta moduler (Rahman & Erlingsson, 2012).

3.1.3 Fukthaltsparametrar

Materialet i en vägkonstruktions omättade zon består av ett trefas- system med *fasta partiklar* av grus eller sten, *vätska* i form av vatten och *gas* i form av luft (Fetter, 2001). Vattnet som förekommer i hålrummen, porerna och mellan kornen i jorden är mer eller mindre hårt bundet till de fasta partiklarna beroende på dess storlek (Svensson, 1997). I figur 17 visas en schematisk figur över ett trefas- system.



Figur 17 - Trefassystem. (Baserad på Yoder & Witczak, 1975)

Nedan följer några vanliga uttryck för att beräkna halterna av de olika komponenterna i ett trefas- system:

Porositeten n definieras som förhållandet mellan porvolymen V_v och den totala volymen V :

$$n = \frac{V_v}{V} \quad [4]$$

Vanligtvis presenteras porositeten i procent.

Porhalten, e definieras som förhållandet mellan porvolymen V_v och volymen på de solida partiklarna V_s :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad [5]$$

Vattenmättnadsgraden, S , definieras som vattenvolymen V_w dividerat med porvolymen V_v :

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad [6]$$

Fukthalten kan beräknas på två olika sätt, antingen som gravimetrisk eller som volymetrisk. Den gravimetriska fukthalten fås genom att dividera vattnets massa m_w med massan på de solida partiklarna m_s :

$$\theta_g = \frac{m_w}{m_s} \quad [7]$$

Den volymetriska fukthalten fås genom att dividera vattenvolymen V_w med den totala volymen V :

$$\theta_v = \frac{V_w}{V} \quad [8]$$

(Fetter, 2001).

Den gravimetriska fukthalten kan även uttryckas med hjälp av den volymetriska fukthalten θ_v , densiteten på vatten ρ_w och densiteten för det solida materialet ρ_d :

$$\theta_g = \frac{\theta_v * \rho_w}{\rho_d} \quad [9]$$

(Das, 2010).

Vattenmättnadsgraden kan definieras som den gravimetriska fukthalten θ_g multiplicerat med den relativa densiteten (specifika vikten), G_s och dividerat med porhalten e :

$$S = \frac{\theta_g * G_s}{e} \quad [10]$$

Den *specifika vikten* definieras som kvoten mellan det solida materialets densitet och densiteten för vatten. Det är en parameter som ofta används i beräkningar inom geoteknik. Den specifika vikten ligger, för de allra flesta jordar, på ett värde mellan 2.6 och 2.9.

Porhalten, e , kan uttryckas:

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_s} - 1 \quad [11]$$

Där γ_w och γ_s är tungheten på vatten respektive tungheten för de solida partiklarna.

3.2 Klimatets inverkan på styvhet

3.2.1 Styvhetsvariation under året

Vid bärighetsutredning bör fuktillståndet hos obundna lager och terrasser beaktas. Fukthalten varierar i väggroppen under olika årstider samt beroende på var i landet vägkonstruktionen befinner sig (Trafikverket, 2011). Figur 18 visar Sveriges klimatzoner indelade efter medelköldmängd.



Figur 18 - Illustration över klimatzoners indelning (Trafikverket TRVK, 2011).

I Trafikverket (2011) finns en rad olika tabeller som visar sambandet mellan årstidernas fuktvariationer och dess inverkan på styvhetsmodulen. Styvhetsmodulerna från Tabell 4 avser parametrar för obundna lager för äldre vägmateriäl. Här visas också tabell 5 som beskriver styvhetsmodulerna för olika typ av materiäl hos undergrunden.

Tabell 4 - Styvhetsmoduler [MPa] för äldre obundna överbyggnadsmateriäl (Trafikverket, 2011).

| Dräneringsgrad 2 | Bärlager | Förstärkningslager |
|---------------------|----------|--------------------|
| Vinter | 1000 | 1000 |
| Tjällossningsvinter | 100 | 1000 |
| Tjällossning | 200 | 100 |
| Senvår | 300 | 125 |
| Sommar | 300 | 125 |
| Höst | 300 | 125 |

Tabell 5 - Styvhetsmoduler [MPa] för undergrundsmaterial (Trafikverket, 2011).

| Dräneringsgrad 2 | 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 | 85 | 50 | 50 | 20 |
| Höst | 85 | 50 | 50 | 20 |

Tabell 4 och tabell 5 är förknippade med dräneringsförmågan hos vägkonstruktionen. Dräneringssystemen är uppdelade i tre olika dräneringsklasser där 1 motsvarar ett effektivt dräneringssystem medan 3 motsvarar en sämre vattenavledning. I tabellerna tas det indirekt hänsyn till styvhetsvariation på grund av bland annat fukthalt. Under tjällossningen är fukthalterna i marken höga och enligt tabell 4 och tabell 5 sjunker styvhetsvärdena under denna period.

Enligt tabell 4 är styvhetskillnaden mellan sommar och tjällossningsperioden 100 MPa för bärlager (300-200) och 25 MPa för förstärkningslager (125-100). Det vill säga att styvhetsvärdena sjunker med 33 % samt 20 %. För undergrundsmaterialen i tabell 5 sjunker styvhetsvärdena under samma period med ungefär 15 MPa (50-35) vilket motsvarar en förlust med 30 %.

3.2.2 Temperaturformel

Elasticitetsmodulen för asfalt kan variera mycket beroende på väderförhållande eftersom dess styvhet påverkas av bland annat yttemperaturen (Huang, 2012). Vid 10°C har asfalt en E-modul som ligger nära 6 500 MPa (Erlingsson, 2010b). För att beräkna E-modulen i asfalten för andra temperaturer kan följande ekvation användas:

$$E_T = E_{T_{ref}} * e^{-b(T-T_{ref})} \quad [12]$$

där:

E_T = styvhetsmodulen på asfaltnivån vid temperaturen T ,

$E_{T_{ref}}$ = styvhetsmodulen på asfalten vid referenstemperatur,

$T_{ref} = 10^\circ\text{C}$,

$E_{T_{ref}} = 6\,500\text{ MPa}$,

$b = 0.065$ (Erlingsson, 2010b)

3.2.3 Fukthaltsmodell

Det är känt att fukthalten i de obundna materialen i en vägkonstruktion ändras med tiden på grund av varierande förutsättningar i omgivningen. Fukthaltens förändring leder även till variationer i de obundna lagrens moduler. Om fukthaltens variationer är känd eller förutspådd är det i många fall viktigt att även kunna beräkna hur de obundna lagrens moduler påverkas. Det finns flera olika modeller för att bestämma den elastiska modulen för de obundna lagren utifrån fukthalten och en av dem är fukthaltsmodellen (MR- Moisture Model) som har utsetts som 2002 Design Guide (NCHRP, 2000).

För att komma fram till fukthaltsmodellen utfördes flera experiment och tester för flera obundna material. Materialprover hämtades från olika platser i USA och blev klassificerade i grupper beroende på vilka kornfraktioner de bestod av. Utifrån dessa prover beräknades torrdensitet, fukthalt och optimal vattenmättnadsgrad. Som tidigare beskrivet i kap 3.1.2 kan triaxialtester utföras för att få fram den resilienta modulen, M_R i obundna vägmaterial. I verkligheten varierar fukthalten i marken över tid, bland annat beroende på dräneringsförmåga. För att uppnå detta i laboratoriet kompakterades och torkades/fuktades provkropparna först till optimala förhållanden. I nästa steg fuktades några prover till önskad fukthalt medan andra torkades. Utifrån dessa provkroppar kunde sedan den resilienta modulen under olika förhållanden tas fram och modellen skapas (Andrei, 2003). I ekvation 13 visas fukthaltsmodellen i ekvationsform och i Figur 14 visas modellen grafiskt.

$$\log \frac{M_R}{M_{R_{opt}}} = a_m + \frac{b - a_m}{1 + \exp[\beta + k_s * (S - S_{opt})]} \quad [13]$$

där:

$$\frac{M_R}{M_{R_{opt}}} = \text{förhållandet för den elastiska modulen}$$

M_R = den elastiska modulen vid en given tid

$M_{R_{opt}}$ = ett referensvärde för den elastiska modulen

a_m = Minimala värdet av $\log(M_R/M_{R_{opt}})$

b = Maximala värdet av $\log(M_R/M_{R_{opt}})$

$$\beta = \ln\left(-\frac{b}{a_m}\right) \quad [14]$$

k_s = Regressionsparameter

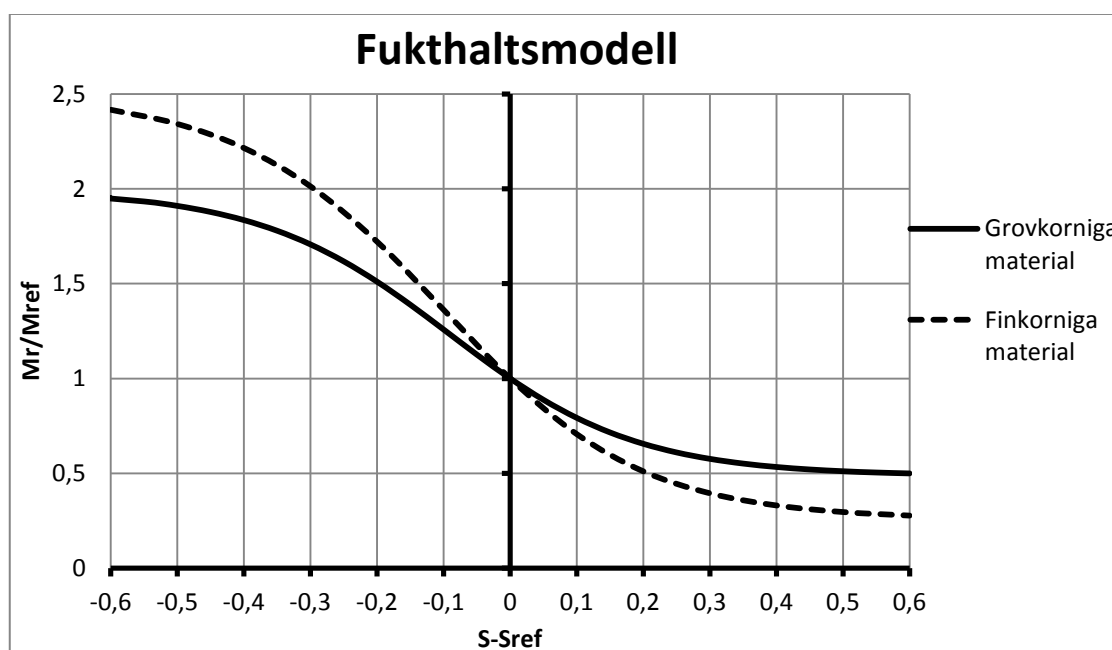
$(S - S_{opt})$ = Variation i vattenmättnadsgrad uttryckt i decimalform

Värden för a_m , b och k_s visas i Tabell 6.

Tabell 6 - Värden på a_m , b , β och k_s för grov- och finkorniga material. (NCHRP, 2000).

| Parameter | Grovkornigt material | Finkornigt material | Kommentar |
|-----------|----------------------|---------------------|--|
| a_m | -0,3123 | -0,5939 | Regressions-parameter |
| b | 0,3 | 0,4 | Antaget värde, motsvarande modulförhållande på 2 och 2,5 |
| β | -0,04 | -0,39 | Fås genom ekvation 11 |
| k_s | 6,8157 | 6,1324 | Regressions-parameter |

Med värden från tabell 6 fås följande utseende på fukthaltsmodellen för ett finkornigt samt ett grovkornigt material:



Figur 19 – Fukthaltsmodell för finkorniga och grovkorniga material.

Värdena på y-axeln motsvaras av förhållandet mellan den beräknade elasticitetsmodulen och referensvärdet på elasticitetsmodulen. Det vill säga att när värdet på y-axeln är 0.5, är den beräknade elasticitetsmodulen 50 % av referensvärdet. x-axeln motsvaras av den uppmätta vattenmättnadsgraden subtraherat med det uppskattade referensvärdet på vattenmättnadsgraden. Ett positivt värde på x-axeln innebär att materialet är blött medan ett negativt värde innebär att materialet är torrt.

Som kan utläsas ur kurvorna i figur 19 har det finkorniga materialet ett större intervall för styvhetsvariation än det grovkorniga materialet. Om vattenmättnadsgraden för ett finkornigt material ökar med 0,2 enheter med utgångsvärde $S - S_{ref} = 0$, sjunker styvheten med ungefär 50 %. Om vattenmättnadsgraden stiger med samma värde för ett grovkornigt material sjunker styvheten med ungefär 35 %. Detta innebär att för samma ökning av vattenmättnadsgrad kommer ett finkornigt material att förlora en större procentuell andel av styvheten än ett grovkornigt material.

3.3 Linjärelastisk teori

Att utreda hur materialen i en vägkonstruktion uppför sig under olika förutsättningar, så som klimatets påverkan och trafikbelastningar, är en komplex uppgift. Därför är det av vikt att ha tillräckliga kunskaper om de mekaniska egenskaperna hos vägbyggnadsmaterialen både i överbyggnaden och i terrassen. Därmed omfattar en analys av en väggropp dels komplexa beräkningar för bestämning av spänningar och töjningar som orsakas av upprepade trafikbelastningar och dels av en förståelse av det strukturella tillståndet hos olika lager i väggroppen.

3.3.1 Elasticitetsteori

Elasticitetsteorin baseras på att alla konstruktionsmaterial har elastiska egenskaper vid deformationer orsakade av en yttre kraft men att dessa deformationer försvinner efter avlastning (Ullidtz, 1998). I detta sammanhang är den elastiska styvheten den viktigaste parametern att ta hänsyn till vid beräkningen av spänningar och töjningar i en väggropp.

Elasticitetsteorin för isotropa material baseras på tre antaganden: jämvikt, kompatibilitet och Hookes lag (Ullidtz, 1998). För isotropa och linjärelastiska material leder Hookes lag till det grundläggande uttrycket och där förhållandet mellan spänning och töjning anses vara konstant:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [15]$$

Om jämvikt och kontinuitet (eller kompatibilitet mellan normal- och skjuvspänningar) uppfylls för ett tvådimensionellt system med \mathbf{z} vinkelrätt mot x , y -planet kan Hookes lag för töjningar istället skrivas som (Timoshenko & Goodier, 1951):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu\sigma_y] \quad [16]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu\sigma_x] \quad [17]$$

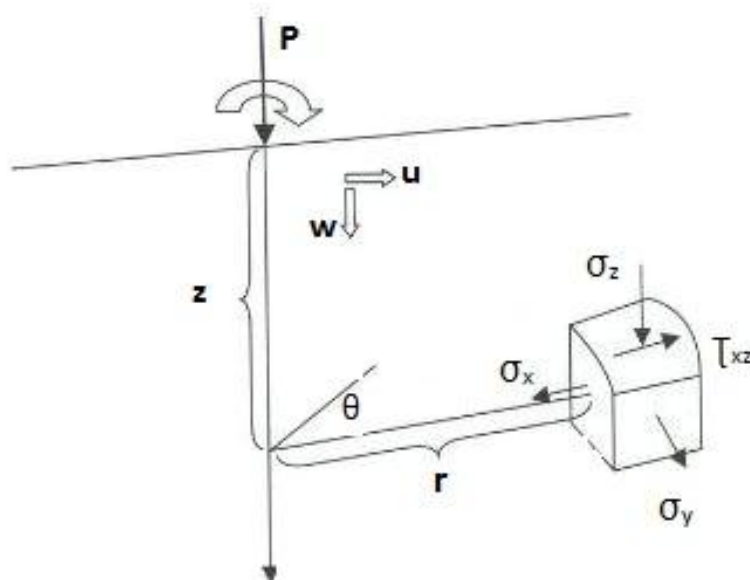
$$\varphi_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \quad [18]$$

Inom vägbyggnadsteknik används den elastiska modulen, \mathbf{M}_r , istället för beteckningen \mathbf{E} . \mathbf{M}_r motsvarar i viss mån den elastiska modulen, \mathbf{E} , då den är en ungefärlig uppskattning. Dessutom är den elastiska modulen, \mathbf{M}_r , baserat på spänningar och töjningar orsakade av snabba belastningar, d v s sådana laster som en vägkonstruktion utsätts för på grund av trafiken (WSDOT, 1995).

En förenkling i elasticitetsteorin innebär att materialet som är utsatt för externa krafter, antas vara perfekt elastiskt eller även kallat idealelastoplastiskt. Med andra ord innebär det att materialet återgår till sin ursprungliga form och volym då avlastning sker. För att definiera den grundläggande principen på bästa sätt antas en elastisk kropp vara homogen och sammanhängande i hela sin volym vilket innebär att de fysiska egenskaperna hos små delar av kroppen är likadana i sin helhet. För att förenkla beräkningen ytterligare definieras materialen som isotropa vilket betyder att dess elastiska egenskaper är lika i alla riktningar (Timoshenko & Goodier, 1951).

Boussinesqs ekvationer

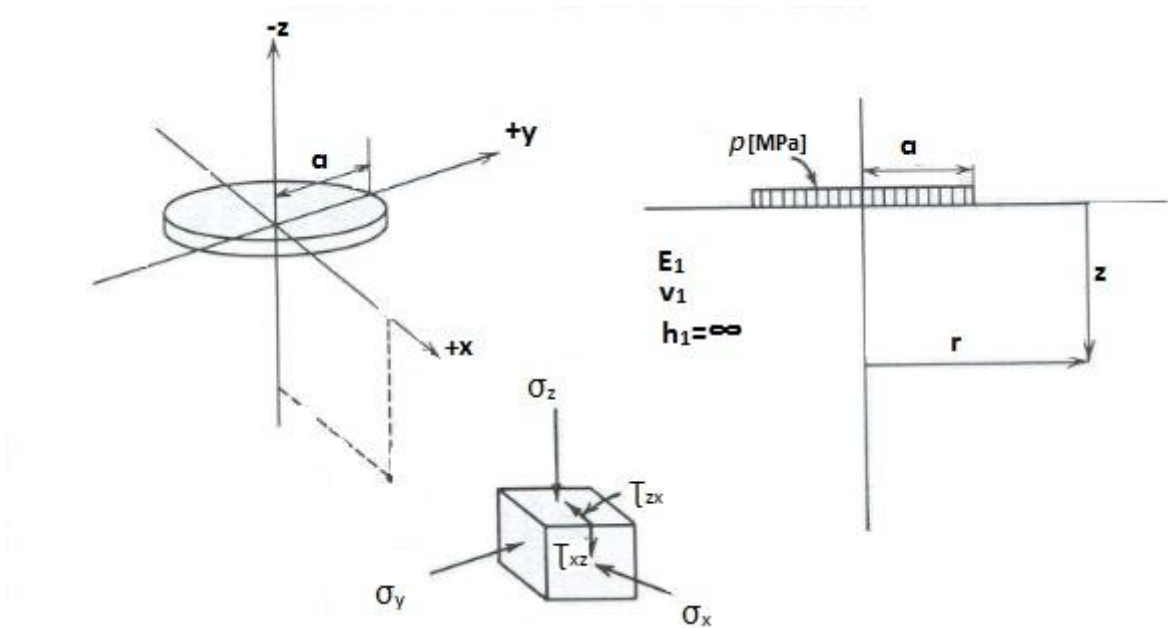
Den enklaste modellen för att beräkna spänningar i ett medium är genom Boussinesqs teori och med en belastning i form av en punktlast, P . Boussinesqs teori (1885) baseras på den klassiska elasticitetsteorin och går ut på att en punktlast appliceras i ett elastiskt halv-oändligt medium. I figur 20 visas samtliga parametrar för Boussinesqs ekvationer.



Figur 20 - Schematisk bild över Boussinesqs teori (Baserad på Papagiannakis & Masad, 2008).

För att kunna beräkna tryck- och skjuvkrafter, töjningar och deformationer i undergrunden krävs en integrering av punktlasten över en cirkulär belastningsarea (Irwin, 2006). Boussinesqs ekvationer som tillämpas för en punktlast är mycket användbara liksom en jämnt fördelad last. Avståndet från lasten behöver inte vara stort då en punktlast utvecklar samma respons som en jämnt fördelad last över en area (Ullidtz, 1998).

Figur 21 visar ett homogent halv-oändligt medium vilket har en definierad elasticitetsmodul E och tvärkontraktionstal ν , också kallat Poissons tal. Mediumets yta är utsatt för en uniform cirkulär last p med radie a . Den axialsymmetriska uppsättningen av lasten q samt uttrycken r/a och z/a ger upphov till spänningar vid en punkt i ett cylindriskt element på djupet z från ytan och avståndet r från den symmetriska axeln. I detta fall utvecklas tre normalspänningar i den belastade punkten; σ_z , σ_x , och σ_y . Dessutom uppkommer en skjuvspänning, τ_{xz} som är ekvivalent med τ_{zx} (Huang, 2012).



Figur 21 - Påkänningars komponenter på djupet z under axialsymmetrisk belastning (Baserad på Yoder & Witczak, 1975).

En annan koppling mellan deflektioner och moduler, både för en punktlast och för en jämnt fördelad last, på ytan ges av Irwin (2006). w_0 representerar där den vertikala deflektionen på ytan av det halv-öändliga mediet och E motsvarar den elastiska modulen. E ersätts med M_R och ger följande uttryck:

För en punktlast P på ytan, d.v.s. när $z=0$:

$$w_0 = \frac{P}{\pi M_R r} (1 - \nu^2) \quad [19]$$

a) För en jämnt fördelad last på ytan med $r = 0$:

$$w_0 = \frac{2q}{\pi M_R a} (1 - \nu^2) \quad [20]$$

I uttrycken ovan är r det radiella avståndet från belastningscentrum medan a är relaterad till radien av den belastade arean (Irwin, 2006).

På samma sätt tillämpas Boussinesqs ekvationer för beräkning av påkänningar i undergrunden, men endast om förhållandet mellan styvheten för det översta lagret och terrassen ligger nära ett. Trafikbelastningen och dess påverkan på ett flexibelt vägobjekt kan i sin enklaste form ses som en punktlast som verkar rakt under hjulens laster. Belastningen verkar då på ytan i ett homogent linjärelastiskt halv-öändligt medium med en oändligt stor area och ett oändligt djupt (Huang, 2012).

Boussinesqs ekvationer gäller för elastiska och isotropa material och för enlagerssystem då normalspänningarna; σ_z , σ_x , och σ_y , inte skapar distorsion i elementens vinklar. På så sätt kan elasticitetsteorin användas med tillämpning av superposition av komponenter för töjningar orsakat av de tre nämnda spänningarna (Timoshenko & Goodier, 1951).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{M_R} \left[\sigma_x - \nu \left((\sigma_y + \sigma_z) \right) \right] \quad [21]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{M_R} \left[\sigma_y - \nu \left((\sigma_z + \sigma_x) \right) \right] \quad [22]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{M_R} \left[\sigma_z - \nu \left((\sigma_x + \sigma_y) \right) \right] \quad [23]$$

$$\gamma_{zx} = \frac{2\tau_{zx}(1+\nu)}{M_R} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad [24]$$

I Ekv. 24 motsvarar G det elastiska mediumets skjuvmodul (Papagiannakis & Masad, 2008). Detta samband mellan spänningar och töjningar kan skrivas som en matris av följande form:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{M_R}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad [25]$$

En utveckling av Timoshenko och Goodiers ekvationer presenterades 1954 i form av ett flertal diagram av Foster och Ahlvin. Syftet med dessa var att bestämma de vertikala och radiella påkänningarna (σ_z och σ_x), den tangentiella spänningen σ_y , skjuvspänningen τ_{zx} samt den vertikala deflektionen w (Foster & Alvin, 1954).

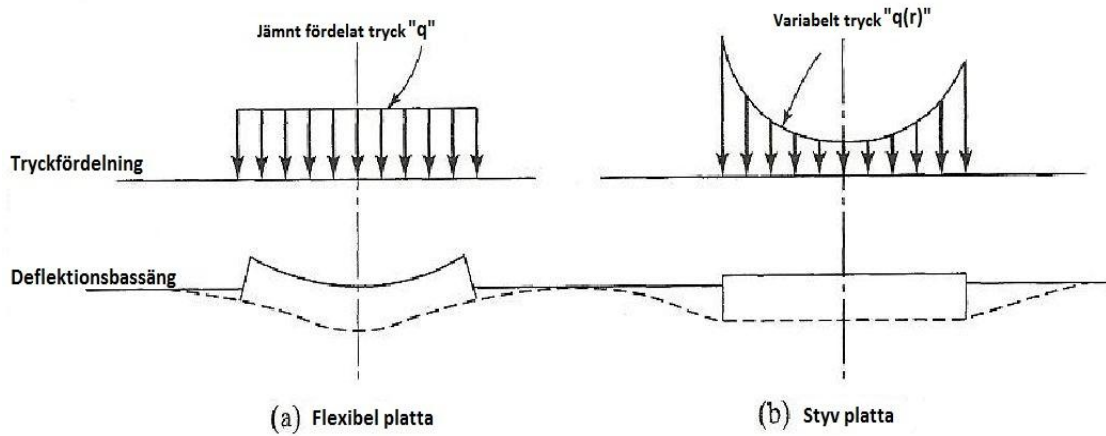
Spänningar och töjningar på symmetriaxel

Med en last påförd på en cirkulär belastningsarea kommer de kritiska påkänningarna, töjningar och deflektioner att ske rakt under belastningscentrum, det vill säga på symmetriaxeln. Analysen av hur lasten utvecklar maximala påkänningar och deflektioner på symmetriaxeln kan göras antingen genom en flexibel eller genom en styv platta (Huang, 2012).

Vid analys av en flexibel vägkonstruktion, är det av vikt av att välja en bra representation av lasten. I normalt fall är lasten på vägytan inte en punktlast utan den är fördelad över en elliptisk area. Kontakten mellan däck och asfaltbeläggningen anses därför vara likadant som trycket från däck. Dessutom är variationen för spänningar relaterad till ett visst djup likadan både för en punktlast som för en jämnt fördelad last (Yoder & Witczak, 1975).

Flexibel och styv platta

Analysen av deflektioner orsakat av en last i ett halv- oändligt medium beror på hur styv eller flexibel plattan är. Figur 22 illustrerar skillnaden mellan båda försöken. För flexibla försök kan lasten från däckets på vägbanan ses som en flexibel platta med radie a och med ett jämnt fördelat tryck q . I det fallet att lasten appliceras på en styv platta, visar försöket att deflektionerna blir desamma på alla punkter på plattan men att tryckfördelning under plattan inte blir uniform (Huang, 2012).



Figur 22 - Skiss över skillnaden mellan flexibla och styva plattor (Baserad på Huang, 2012).

Påkänningarna rakt under belastningscentrum för en *flexibel platta* kan uttryckas:

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{1.5}} \right] \quad [26]$$

$$\sigma_x = \frac{q}{2} \left[1 + 2\nu - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{1.5}} \right] \quad [27]$$

Det bör noteras att i ekvation 26 är den vertikala spänningen oberoende av den elastiska modulen och tvärkontraktionstalet. Den radiella spänningen i ekvation 27 är beroende av Poissons tal men oberoende av E .

Från ekv.21 och 23 erhålls:

$$\varepsilon_x = \frac{(1+\nu)q}{2M_R} \left[1 - 2\nu - \frac{2(1-\nu)z}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{1.5}} \right] \quad [28]$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)q}{M_R} \left[1 - 2\nu + \frac{2\nu z}{(a^2+z^2)^{0.5}} - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{1.5}} \right] \quad [29]$$

Och den vertikala deflektionen, w , kan bestämmas från:

$$w = \frac{(1+\nu)qa}{M_R} \left\{ \frac{a}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{1-2\nu}{a} [(a^2+z^2)^{0.5} - z] \right\} \quad [30]$$

Om det antas att $\nu = 0.5$ i ekv.30 fås:

$$w = \frac{3qa^2}{2M_R(a^2+z^2)^{0.5}} \quad [31]$$

Med $z = 0$ i ekv.30 d v s på ytan av det halv-öändligt medium erhålls:

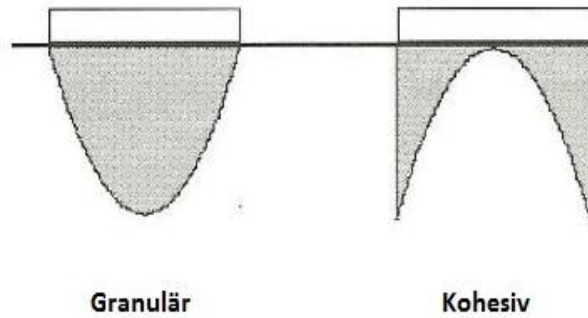
$$w_0 = \frac{2(1-\nu^2)qa}{M_R} \quad [32]$$

För styva plattor i elastiskt medium:

Om belastningen är påförd via en styv cirkulär platta och deflektionen nära ytan är likadan i alla punkter under plattan, erhålls spänningsfördelningen uttryckt som (Ullidtz, 1998):

$$\sigma_0(r) = \frac{\sigma_0 a}{2\sqrt{a^2-r^2}} \quad [33]$$

σ_0 representerar medelvärdet för spänningarna, a radien på plattan och r motsvarar avståndet från belastningscentrum till den punkt där bestämningen av den ytliga spänningen sker. Den teoretiska spänningsfördelningen under en styv platta, på ett elastiskt medium, har oändliga stora värden kring perimetern. Detta förekommer dock inte i ett verkligt vägmateriell (Ullidtz, 1998).



Figur 23 - Typisk spänningsfördelning för granulära och kohesiva jordarter under plattbelastningsförsök (Baserad på Ullidtz, 1998).

Dessutom kan tryckfördelningen under en styv platta bestämmas med följande ekvation:

$$q(r) = \frac{qa}{2(a^2+r^2)^{0.5}} \quad [34]$$

Där q är ett medelvärde för trycket, vilket motsvarar den totala lasten dividerat med arean. Därmed sker det minsta trycket vid centrum av belastningsarean och är detsamma som $\frac{1}{2}q$ (Huang, 2012). Plattans deflektion kan bestämmas genom integrering av punktlasten över arean:

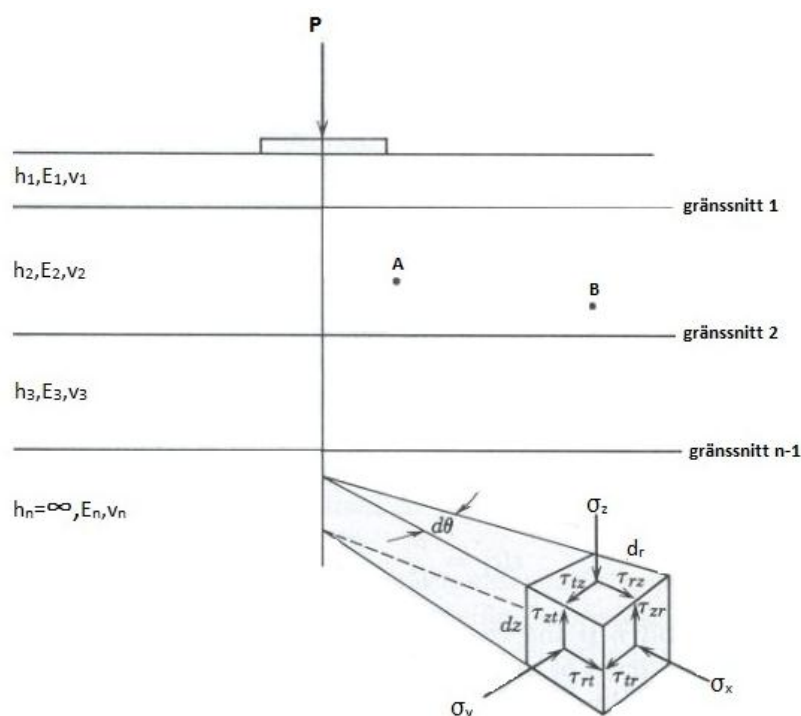
$$w_0 = \frac{\pi(1-\nu^2)qa}{2M_R} \quad [35]$$

3.3.2 Flerlayerssystem

I verkligheten består en vägkonstruktion av ett flertal lager, vilka kan ses som en representation av vägmaterialet och dess egenskaper. Utifrån detta har en multielastisk teori utvecklats baserat på den klassiska elasticitetsteorin. Denna används för att få en bättre förståelse av väggroppen i sin helhet.

För en lösning av ett flerlayerssystems spänningar och töjningar måste en rad antaganden göras. Yoder & Witczak (1975) skriver att sex antaganden kan vara tillräckligt för att uppfylla kraven:

1. Vägmaterialet hos alla lager ska vara homogena, d. v. s. att materialets egenskaper måste vara likadana och gälla såväl på punkt A som på punkt B i ett medium.
2. Varje lager utom det nedersta ska ha en bestämd tjocklek. Dessutom måste alla lager vara oändliga i horisontellt led.
3. Varje lager måste vara isotropa.
4. Total friktion utvecklas på var och en av gränslinjerna mellan lagren.
5. Inga skjuvkrafter förekommer på ytan.
6. Lösningarna vid spänningsanalys karakteriseras av två materialegenskaper och gäller för varje enskilt lager.

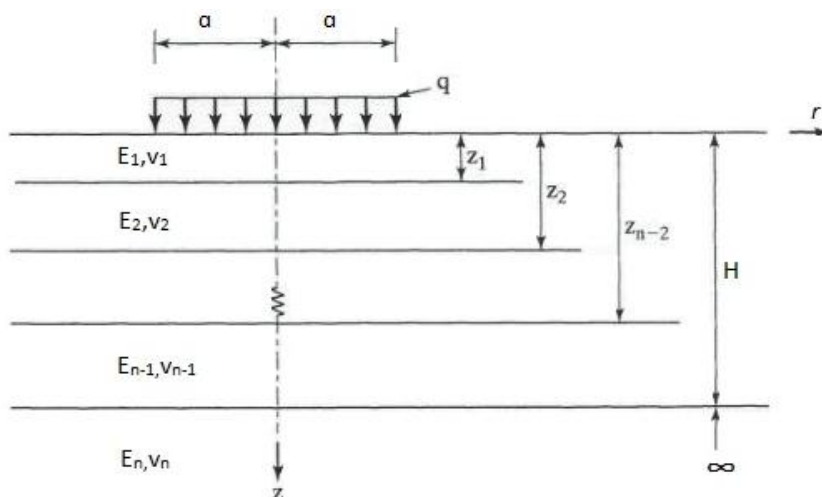


Figur 24 - Skiss över ett elastiskt flerlayerssystem (Baserat på Yoder & Witczak, 1975).

En vidare utveckling av elasticitetsteorin och dess differentialekvationer inklusive randvillkor för ett tvålayerssystem presenterades av Burmister 1943 (Ullidtz, 1998). Eftersom en vägöverbyggnad inte kan ses som homogen i verkligheten har Boussinesqs elastiska teori vissa begränsningar, t. ex vid flerlayerssystem, men där kan istället Burmisters teori tillämpas. (Doré & Zubeck, 2009).

En approximativ lösning med syfte att beräkna spänningar och töjningar hos väggroppen kan alltså göras med hänsyn till de antaganden som beskrivits ovan.

I figur 25 beaktas en vägkonstruktion som består av ett system av flera lager, där materialen är styvare på toppen och där styvheten avtar ju djupare materialen befinner sig i systemet (Huang, 2012).



Figur 25 - Ett flerlayerssystem med cylindriska koordinater (Baserad på Huang, 2012).

Tvålayerssystem

För att ett tvålayerssystem skall uppfylla Burmisters teori bör en rad av antagande uppfyllas (Huang, 2012). De sex antaganden som beskrivits ovan gäller även för ett tvålayerssystem. Utöver dessa gäller även följande två antaganden:

1. Varje lager bör ha en viss tjocklek h utom det understa lagret vilket antas vara oändligt tjockt.
2. Randvillkoren när det gäller *kontinuitet* i layers gränslinjer bör uppfyllas. Det vill säga att vertikal- och skjuvspänning samt vertikal- och radiell förskjutning måste vara av samma storlek. För friktionsfri interfäs gäller andra villkor.

Den exakta modellen för att analysera ett tvålayerssystem antas bestå av ett tjockt ABT-lager placerat ovanpå terrassen. Här beaktas främst den vertikala spänningen som uppkommer på toppen på terrassen, vilken är en viktig parameter vid vägdimensionering (Huang, 2012).

Burmister (1945) menar att den vertikala deflektionen på ytan även borde beaktas som ett viktigt kriterium vid vägdimensionering. Därmed kan den totala deflektionen vid ett två-lager system med flexibel platta bestämmas från:

$$w = \frac{1.5qa}{M_{R2}} F_w \left[\frac{a}{h}, \frac{E_2}{E_1} \right] = \frac{1.5qa}{M_{R2}} F_w \quad [36]$$

I ekvation 36, är F_w deflektionsfaktor och kan utläsas från olika diagram Burmisters (1945). Deflektionsfaktorn bestäms om sambandet mellan de elastiska modulerna för båda lager, M_{r1}/M_{r2} , och kvoten a/h är kända. a -värdet och q -värdet i ekvation 36 motsvarar radien respektive lasten.

En analytisk empirisk metod för att bestämma töjningar och spänningar för ett tvålagerssystem ges av Odemarks (1949). Odemarks metod baseras på antagandet att spänningar och töjningar under ett lager endast beror på styvheten för det analyserade lagret. Om modulen, Poissons tal och tjocklek för ett lager ändras men att styvheten håller sig oförändrad så kommer spänningarna och töjningarna under lagret hålla sig relativt oförändrade (Ullidtz, 1998).

Styvheten hos ett lager är proportionell till:

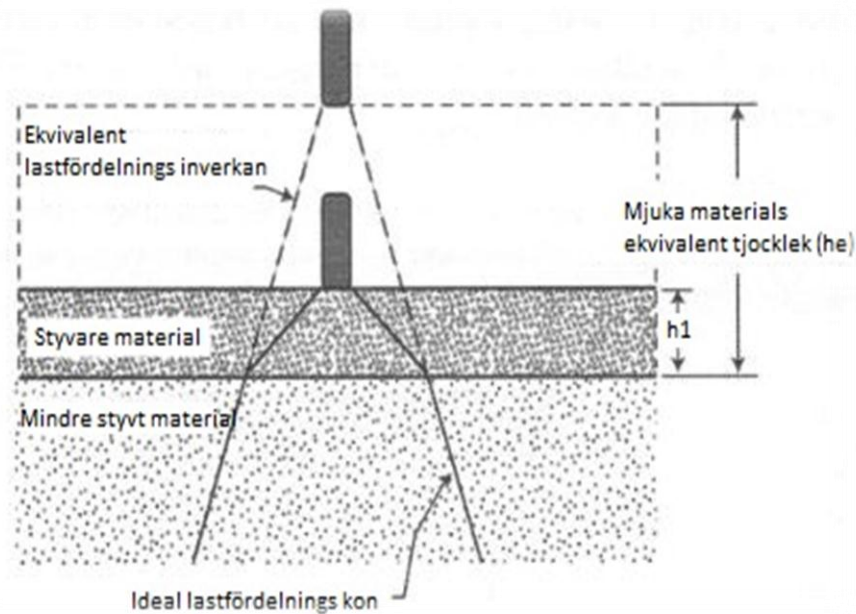
$$\frac{h^3 E}{1-\nu^2} \quad [37]$$

Här representerar h lagrets tjocklek. Den ”ekvivalenta” tjockleken, h_e , kan bestämmas från:

$$\frac{h_1^3 E_1}{1-\nu_1^2} = \frac{h_e^3 E_2}{1-\nu_2^2} \quad [38]$$

Eller

$$h_e = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{1-\nu_2^2}{1-\nu_1^2}} \quad [39]$$



Figur 26 - Ekvivalent tjocklekens Metod (MET). Odemarks transformation för ett flerlagerssystem (Baserad på Doré & Zubeck, 2009).

Figur 26 representerar transformationen som används i ett halvoändligt halvmedium där Boussinesqs ekvationer får användas men endast för spänningar, töjningar och förskjutningar under gränslinje. Dessutom påpekar Ullidtz (1998) att Odemarks antaganden inte är matematiskt rätt och bör användas med en korrektionsfaktor f . Syftet med att använda f vid Odemarks metod samt att ha samma Poisson's tal för alla lager är att få en lösning så nära elasticitetsteorin som möjligt (Ullidtz, 1998).

I så fall fås f enligt följande ekvation:

$$h_e = f \cdot h_1^3 \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \quad [40]$$

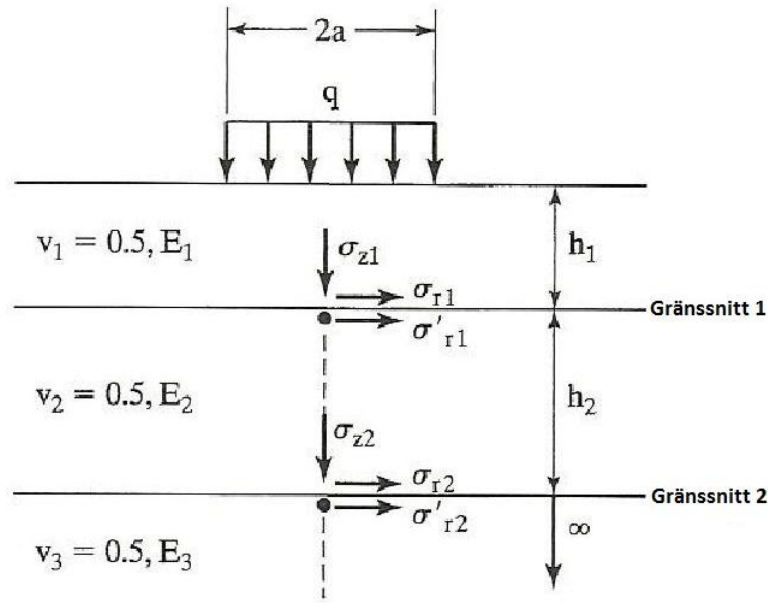
Användningen av Odemarks metod med en korrektionsfaktor ($f = 0.8$ förutom för det första gränssnittet. Där är $f = 0.9$ för fallet av ett tvålayerssystem) kan resultera i en mycket bra överstämmelse med elasticitetsteorin. Pålitliga resultat erhålls om metoden kan "kalibreras" mot uppmätta värden för spänningar och töjningar ur en verklig vägkonstruktions modell (Ullidtz, 1998).

För ytterligare lösningar av Odemarks ekvation kan approximationen i ekvation 41 används. Här förutsätts att ekvationen har utvecklats med korrekta tjocklekar för varje lager. Dessutom förutsätts det att dessa tjocklekar motsvarar en ekvivalent tjocklek med respektive modul som är densamma som modulen för det nedersta lagret (Papagiannakis & Masad, 2008).

$$h_e = f \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ h_i \left(\frac{E_i}{E_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \quad [41]$$

Trelagerssystem

Figur 27 visar alla parametrar vid ett trelagerssystem samt spänningar vid gränssnitt på symmetriaxeln. I detta fall kan trelagerssystemet ses som en utveckling av tvålayerssystemet av Burmister (Burmister, 1945).



Figur 27 - Spänningar vid gränssnitt för ett trelagerssystem (Baserad på Huang, 2012)

Användning av ekv.21 och 23 och med Poissons tal $\nu = 0.5$ för radiella töjningar ger:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{M_R} (\sigma_z - \sigma_x) \quad [42]$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2M_R} (\sigma_x - \sigma_z) \quad [43]$$

Från ekv.42 och 43 fås.

$$\varepsilon_z = -2\varepsilon_x \quad [44]$$

N-lager system

De elastiska modulerna, som ingår i en vägkonstruktions olika lager, kan bestämmas genom bakåtberäkningar med hjälp av avancerade datorprogram. Den klassiska elasticitetsteorin ligger även bakom differentialekvationerna som krävs för att få fram spänningar och töjningar för ett flerlayerssystem. För dessa beräkningar används en spänningsfunktion ” ϕ ” som ska tillfredsställa följande ekvation för varje lager (Huang, 2012):

$$\nabla^4 \phi = 0 \quad [45]$$

För ett system med axelsymmetriskt jämnt fördelad spänning gäller:

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) [46]$$

Där \mathbf{r} och \mathbf{z} representerar de cylindriska koordinaterna för radiella respektive vertikala riktningar. Om spänningsfunktionen ” ϕ ” fås ur uttrycken ovan kan spänningar, töjningar och förskjutningar bestämmas med följande ekvationer:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad [47]$$

$$\sigma_x = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right) \quad [48]$$

$$\sigma_y = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad [49]$$

$$\tau_{xz} = \frac{\partial}{\partial r} \left((1 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \quad [50]$$

$$w = \frac{1+\nu}{M_R} \left((1 - 2\nu) \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad [51]$$

$$u = -\frac{1+\nu}{M_R} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} \right) \quad [52]$$

Eftersom Ekv.45 och 46 är fjärde ordningens differentialekvationer behöver fyra integrationskonstanter som bestämmas utifrån rand- och kontinuitetsvillkor. Om $\rho = r/H$ och $\lambda = z/H$ används i Ekv. 45 och 46 erhålls genom substitution för det i :e lagret:

$$\phi_i = \frac{H^3 J_0(m\rho)}{m^2} \left[A_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - B_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} + C_i m \lambda e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i m \lambda e^{-(\lambda - \lambda_{i-1})} \right] \quad [53]$$

Där H motsvarar avståndet från ytan tills det översta gränssnittet av det nedersta lagret. Därmed tillfredställer ekv. 53 de nämnda ekvationerna där J_0 representerar en Besselfunktion av första slaget och ordning 0. För att tillämpa Ekv. 53 krävs att rand- och kontinuitetsvillkor för integrationskonstanter A , B , C och D uppfylls och sedan bestäms för varje lager. I ekv. 53 varierar i -index från 1 till n , vilket relateras till det i :e lagret. Sådana rand- och kontinuitetsvillkor som tillfredställer ekv. 53 bör gälla för var och ett av lagren (Huang, 2012). För det översta lagret exempelvis, när $i = 1$ och $\lambda = 0$ erhålls randvillkoren:

$$(\sigma_z^*)_1 = -m J_0(m\rho) \quad [54]$$

$$(\tau_{xz}^*)_1 = 0 \quad [55]$$

Vilka resulterar i två ekvationer:

$$\begin{bmatrix} e^{-m\lambda_1} & 1 \\ e^{-m\lambda_1} & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -(1 - 2\nu_1)e^{-m\lambda_1} & 1 - 2\nu_1 \\ 2\nu_1 e^{-m\lambda_1} & 2\nu_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad [56]$$

Samtliga ekvationer för de flerlayerssystem som presenterats hittills baseras på antagandet att lagren har samma värden för vertikal- och skjuvspänningar. Dessutom är de vertikala och radiella förskjutningarna på varje punkt längs gränssnittet lika. Kontinuitetsvillkoren när $\lambda = \lambda_1$ blir då:

$$(\sigma_z^*)_i = (\sigma_z^*)_{i+1} \quad [57]$$

$$(\tau_{xz}^*)_1 = (\tau_{rz}^*)_{i+1} \quad [58]$$

$$(w^*)_i = (w^*)_{i+1} \quad [59]$$

$$(u^*)_i = (u^*)_{i+1} \quad [60]$$

Som resulterar i följande fyra ekvationer:

$$\begin{bmatrix} 1 & F_i & -(1 - 2v_i - m\lambda_i) & (1 - 2v_i + m\lambda_i)F_i \\ 1 & -F_i & 2v_i + m\lambda_i & (2v_i - m\lambda_i)F_i \\ 1 & F_i & 1 + m\lambda_i & -(1 - m\lambda_i)F_i \\ 1 & -F_i & -(2 - 4v_i - m\lambda_i) & -(2 - 4v_i + m\lambda_i)F_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} F_{i+1} & 1 & -(1 - 2v_{i+1} - m\lambda_i)F_{i+1} & 1 - 2v_{i+1} + m\lambda_i \\ F_{i+1} & -1 & (2v_{i+1} + m\lambda_i)F_{i+1} & 2v_{i+1} - m\lambda_i \\ R_i F_{i+1} & R_i & (1 + m\lambda_i)R_i F_{i+1} & -(1 - m\lambda_i)R_i \\ R_i F_{i+1} & -R_i & -(2 - 4v_{i+1} - m\lambda_i)R_i F_{i+1} & -(2 - 4v_{i+1} + m\lambda_i)R_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{Bmatrix} \quad [61]$$

där F_i och R_i erhålls från:

$$F_i = e^{-m(\lambda_i - \lambda_{i-1})} \quad [62]$$

$$R_i = \frac{E_i}{E_{i+1}} \frac{1+v_{i+1}}{1+v_i} \quad [63]$$

De spänningar och töjningar som uppstår för varje lager borde försvinna när λ går mot oändligheten. Detta innebär att ekv. 53 för det nedersta lagret, med $i = n$ blir:

$$A_n = C_n = 0 \quad [64]$$

Resultatet blir då att det behövs $4n$ integrationskonstanter för att lösa ett n -lager system. Om ekv. 64 beaktas kan resten av de $4n - 2$ konstanterna bestämmas från den $4n - 2$ ekvationer, där två kommer från ekv. 56 och två kommer från ekv. 61. För att förenkla beräkningen vid simultana ekvationer behövs endast två ekvationer istället för de $4n - 2$ ekvationerna presenterade ovan. Denna förenkling fås genom en transformation av ekv. 61 och kan uttryckas som:

$$\begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \times 4 \\ \text{matrix} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{Bmatrix} \quad [65]$$

Denna ekvation gör att ett samband relateras mellan konstanterna för det översta och det understa lagret genom upprepade multiplikationer. Sambandet kan uttryckas genom följande matris:

$$\begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \times 2 \\ \text{matrix} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} B_n \\ D_n \end{Bmatrix} \quad [66]$$

När ekv. 66 ersätts i ekv. 56 erhålls två ekvationer med två okända parametrar, B_n samt D_n . När dessa är bestämda kan de introduceras i ekv. 65 som tillsammans med ekv. 64 ger konstanterna för det $(n - 1)$:a lagret. Samma procedur gäller för att få konstanterna för resterande lager, med start underifrån. Detta görs genom upprepade beräkningar (Huang, 2012).

Samtliga material hos en vägkonstruktion har hittills behandlats som linjärelastiska och har blivit modellerade genom en förenkling av verkligheten. Ifall ett noggrannare resultat krävs bör ett icke-linjärt system beaktas där styvheten är spänningsberoende. Denna del tas dock inte med i detta examensarbete.

3.4 Bakåtberäkning

Bakåtberäkning är en utbredd analysmetod som används för att kunna bestämma elasticitetsmodulerna för de olika lagren i en vägkonstruktion. Metoden baseras på elastisk flerlagersteori och modeller som gör det möjligt att i godtyckliga punkter i vägkonstruktionen beräkna spänningar, töjningar och deflektioner (Doré & Zubeck, 2009).

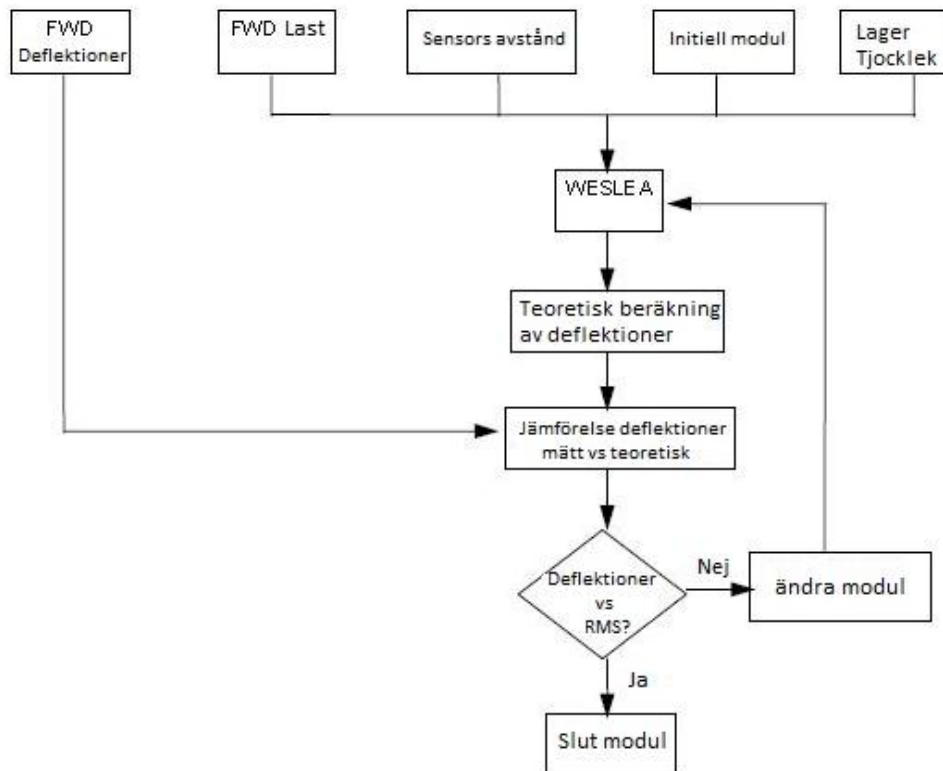
Genom kända lagertjocklekar och uppskattade Poissons tal för vägkonstruktionens material är det möjligt att hitta moduler som teoretiskt sett ger samma deflektionskurva som den fallviktsmätningen genererade (Doré & Zubeck, 2009). Bakåtberäkningsprogram använder sig av iterativa beräkningar där en initial modul antas och används för att beräkna deflektionen. Deflektionen jämförs sedan med de i fält uppmätta värdena. Genom att justera den antagna initiala modulen och göra om beräkningarna flera gånger kan till slut ett teoretiskt värde på modulerna hittas, med en viss feltolerans, som motsvarar fältvärdena (Irwin, 2006).

Beräkningarna som görs i bakåtberäkningsprogram bygger på flera antaganden. Till exempel görs antagandet om linjärelastiskt beteende hos de olika lagren i väggroppen vilket minskar komplexiteten i beräkningarna även om det ger vissa begränsningar (Doré & Zubeck, 2009).

Idag finns det flera olika bakåtberäkningsprogram ute på marknaden så som ELMOD, BOUSDEF, MODULUS, WESDEF, MODCOM och EVERCALC (Erlingsson, 2010a). Det program som används för att utföra beräkningarna i denna rapport är EVERCALC.

3.4.1 EVERCALC

Som tidigare nämns använder programmet EVERCALC linjärelastisk teori för att bestämma styvhet, spänningar och töjningar i en väggkropp. EVERCALC utgår alltså ifrån flerlagersteorin som beskrivs i kapitel 3.3.2. Den linjärelastiska teorin inkluderar bland annat antagandet om att lagren är oändligt långa i horisontalled, har enhetlig tjocklek och att understa lagret är halvoändligt i vertikalled. Dessutom innebär den linjärelastiska teorin att vägens alla lager är komponerade av homogena linjärelastiska material (WSDOT, 1995b). I Figur 28 visas, i förenklad form, processen som EVERCALC använder.



Figur 28 - Förenklat flödesdiagram för EVERCALC (Baserad på WSDOT, 1995b)

Vid användning av EVERCALC krävs bland annat indata baserat på vägkonstruktionens och fallviktsutrustningens utseende. I programmet matas först lastplattans radie in och antalet sensorer som finns på fallviktsutrustningen. Dessutom krävs måtten på sensorernas radiella avstånd från lastplattan. Nästa steg är att mata in vägkonstruktionens lageregenskaper. För de fall där elasticitetsmodulen är okänd definieras en initiell E-modul och ett rimligt intervall som modulen kan variera inom (WSDOT, 1995b). Det krävs även ett värde på Poissons tal för de olika materialen, men då parametrarnas inverkan på beräkningen är relativt liten är en grov uppskattning tillräcklig (Huang, 2012). Även ett maximalt antal iterationer skall matas in, ett värde på det minsta kvadratiske medelvärdets tolerans (RMS) och toleransen för modulen, båda toleranserna i procent. Enligt WSDOT (1995b) är 10 iterationer och 1 % tolerans både på RMS och på modulen typiska värden. Bakåtberäkningen avslutas när något eller flera av dessa krav är uppfyllda (WSDOT, 1995b). RMS-värdet speglar skillnaden mellan den beräknade deflektionen och den uppmätta deflektionen. Detta innebär att RMS är ett mått på hur väl deflektionerna konvergerar mot varandra.

Ett lågt värde på RMS innebär att den bakåtberäknade deflektionen stämmer bra överens med den uppmätta deflektionen (WSDOT, 1995a). Enligt WSDOT(1995a) kan RMS erhållas med följande formel:

$$RMS (\%) = \left(\sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{bi} - d_{ui}}{d_{ui}} \right)^2} \right) \cdot 100 \quad [67]$$

Där:

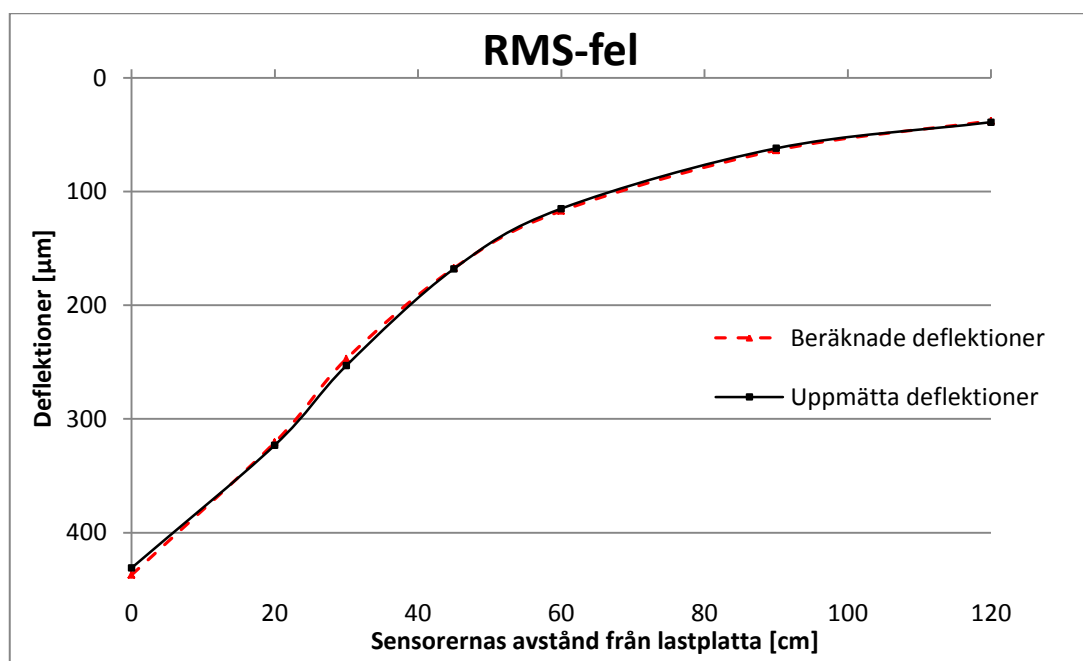
RMS = Minsta kvadratiska medelvärdeets tolerans

d_{bi} = Beräknade deflektionen vid sensor i .

d_{ui} = Uppmätta deflektionen vid sensor i .

n_d = Antalet sensorer använt vid bakåtberäkning.

För att få en bild av vad RMS-värdet verkligen innebär visas ett exempel med deflektioner från den 13 oktober i figur 29. Den ena kurvan motsvarar de beräknade deflektionerna och den andra kurvan motsvarar de uppmätta deflektionerna. En bra anpassning mellan kurvorna innebär att de beräknade deflektionerna passar bra ihop med de i fält uppmätta deflektionerna och detta ger också ett lägre värde på RMS. Kurvorna i figur 29 motsvarar ett RMS-värde på 2 %.



Figur 29 – Exempel på hur RMS-fel kan tolkas. Ju bättre kurvan för de beräknade värdena passar med kurvan för de uppmätta värdena, desto mindre blir också RMS.

När lageregenskaperna matas in bör kontroll av tjocklekarna på dem göras. Tunna lager på slitlager (<75 mm) eller bärlager kan ge orimliga resultat och bör därför beaktas.

Ifall det är troligt att ett styvt lager, t.ex berggrund, finns på relativt grunt djup skall hänsyn till detta tas och ett styvt lager läggs då till i beräkningen. Ett fast värde på det styva lagrets elasticitetsmodul definieras och bör enligt WSDOT (1995b) ligga mellan 700 till 7000 MPa beroende på material och markförhållande. Med ett inverkanse styvt lager med fast styvhet får terrassen istället en bestämd tjocklek till skillnad från annars då terrassen har en oändlig tjocklek. Tillägg av ett styvt lager ger generellt ett lägre värde på terrassens elasticitetsmodul och ett högre värde på förstärknings- och bärlagrets elasticitetsmodul (WSDOT, 1995b).

Det sista steget i EVERCALC innan själva bakåtberäkningen påbörjas är att fylla i mätdata från fallviktsprovnings. Deflektionerna matas in tillsammans med den påförda lasten och aktuell temperatur under provning. Vid bakåtberäkningen utgår EVERCALC från de angivna initiella modulerna och ger via dem ett värde på deflektionen för varje sensor. Genom en eller flera iterationer anpassar programmet sedan de olika lagrens moduler, inom det givna intervallet, för att hitta den bästa anpassningen mellan uppmätta och teoretiska värden. Förutom modulernas värde kan även spänningar och töjningar i de olika lagrena bestämmas (WSDOT, 1995b).

Vanliga elasticitetsmoduler och värden på Poissons tal för olika material presenteras i tabell 7.

Tabell 7 - Approximativa värden för elasticitetsmoduler samt tvärkontraktionstal (Poissons tal) (Baserad på Erlingsson, 2010a).

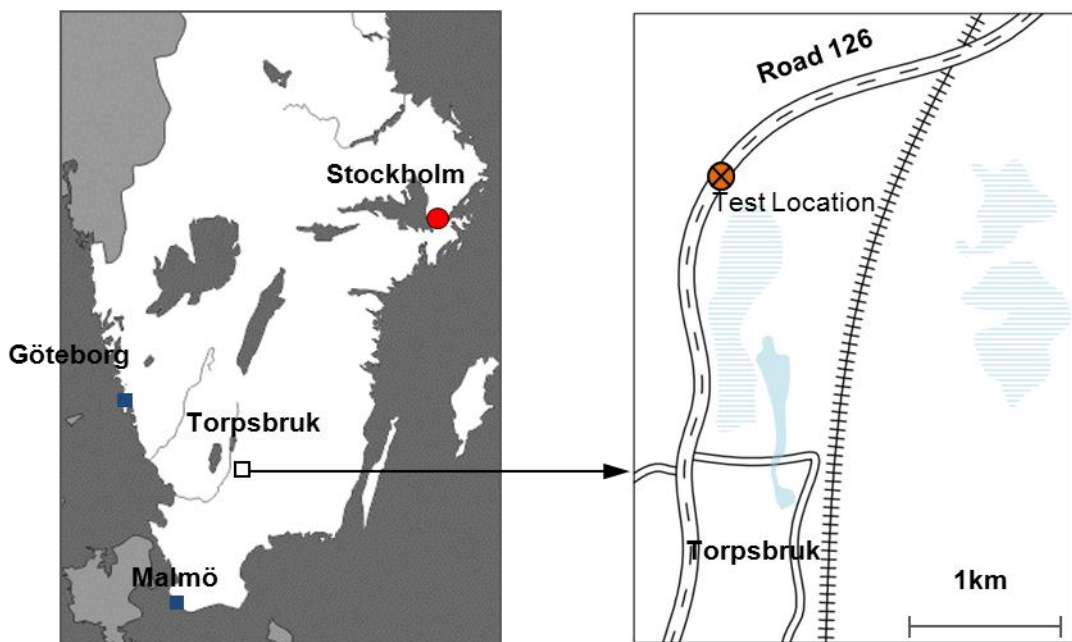
| Material | E-modul (E, Mr) [MPa] | Tvärkontraktionstal (ν) |
|--|--------------------------|----------------------------------|
| Asfaltbetong (osprucken) | | |
| 0°C | 13500 – 35000 | 0.25 - 0.30 |
| 20°C | 2000 – 3500 | 0.30 - 0.35 |
| 60°C | 150 - 350 | 0.35 - 0.40 |
| Krossat grus för bärlager (rent och väl-dränerat) | 150-600 | 0.35 |
| Naturgrus för förstärkningslager | | |
| Rent, väl-dränerat | 70 – 400 | 0.35 |
| Rent, dåligt dränerat | 20 - 100 | 0.4 |
| Terrass (Dränerad) | | |
| Grusig och/eller sandig jord | 70-400 | 0.40 |
| Siltig jord | 35 - 150 | 0.42 |
| Berggrund (Intakt/obruten) | 2000 - 7000 | 0.20 |

4. Torpsbruks testområde

4.1 Beskrivning av platsen

Fältmätningarna som rapporten bygger på utfördes under sommar- och höstmånaderna 2011 på Länsväg 126 utanför Torpsbruk. Vägsträckan är belägen i Småland i södra Sverige, cirka 5 km norr om Moheda. Lv 126 öppnades för trafik i juli 1985 och är en tvåfilig väg med körfältsbredd 3.5 m. Dessutom har vägen en 0.5 m bred icke-asfalterad vägren. Den skattade årsmedeldygnstrafiken (ÅDT) för båda riktningarna var cirka 1160 fordon år 2009, varav 18,9% (220 fordon) var tung trafik (Trafikverket, 2012).

Vägsträckan ligger i jordskärning öster om ett höjdområde vilket medför att ytvattnet efter regn i stor grad rinner ner mot vägen. Under försommaren 1985 uppmättes på platsen en hög grundvattennivå som konsekvens av vattnet som trycker på från höjdområdet. Normalmorän är den dominerande jordarten på sträckan, dock är den inte homogen utan genomdragen av lager och skikt av sorterat material med relativt runda kornfraktioner. Eftersom det förekommer lager med grovkorniga material (grusigt, sandigt) medför detta att vatten lätt kan transporteras genom dessa partier. Denna situation medför att studieområdet karakteriseras av en hög grundvattennivå orsakade från vattnet som strömmar in i vägkonstruktionen (Bäckman, 1986). Dessutom tyder tidigare rapporter på att berggrund ligger på relativt grunt djup (Sveinsdóttir, 2011).



Figur 30 - Kartor över undersökningsområdet på Lv 126 Torpsbruk med geografiska koordinater: 57.047600, 14.566020 (Salour & Erlingsson, 2012).

Vägkonstruktionen består av tre flexibla lager ovanpå en sandig-siltig terrass. Det översta lagret består av tre tunna bituminösa beläggningar, av typ ABT 16 B160/220, med en total tjocklek på 100 mm. Det bundna lagret består dels av en 26 mm asfaltbeläggning pålagt år 2005 och dels ett 24 mm lager pålagt i juli 2001. Båda har en maximal kornstorlek på 16 mm och är belagda på ett ursprungligt asfaltlager från 1985 med tjocklek 50 mm (Salour & Erlingsson, 2012). Under ABT-lagret finns ett 160 mm tjockt bärlager av krossad sten och därunder ett 300 mm tjockt förstärkningslager av naturligt sandigt-grus. Hela vägens uppbyggnad visas i tabell 8.



Figur 31 - Mätplatsen på Lv 126 norr om Torpsbruk i Småland (Salour & Erlingsson, 2012)

Tabell 8 - Vägens uppbyggnad med respektive tjocklekar (Baserad på Salour & Erlingsson, 2012).

| Lager | Tjocklek, mm | Benämning |
|--------------------|--------------|-------------------------|
| ABT 16 160/220 | 26 | Tät asfaltbetong (2005) |
| ABT 16 160/220 | 24 | Tät asfaltbetong (2001) |
| ABT 16 160/220 | 50 | Tät asfaltbetong (1985) |
| Bärlager | 160 | Krossad sten |
| Förstärkningslager | 300 | Naturligt sandigt-grus |
| Terrass | - | Naturligt Sandig-siltig |

4.1.1 Igensättningsförsök

För att återskapa scenariot med en icke-fungerande dränering på Lv 126 blockerades dräneringsrörens utlopp mellan den 10^{de} juni och 15^{de} september 2011. Detta för att kunna utvärdera hur ökade fukthalter påverkar vägens bärlighet. Igensättningen gjordes på ett spann av ungefär 200 meter. Fukthalterna har från november 2009 mätts kontinuerligt och före, under och efter igensättningen har även fallviktsmätningar gjorts.



Figur 32 - Till vänster syns igensättning av dräneringsutloppet (Hansson et al., 2012). Den högra bilden visar vattenansamling i diket den 1 augusti (Erlingsson & Salour, 2011).

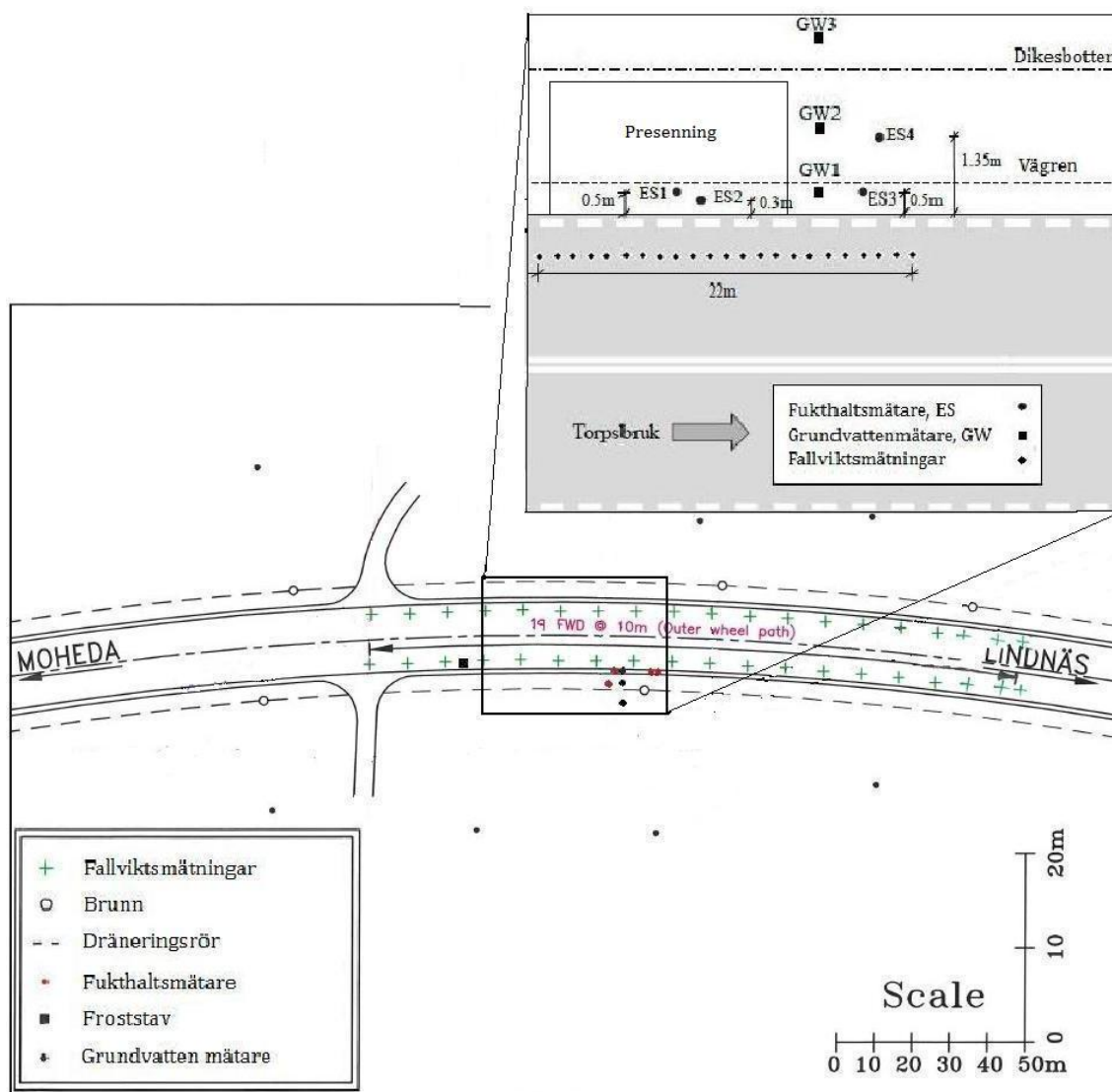
4.2 Mätningar

Fallviktsmätningar, fukthaltsmätningar och övrig data har tillhandahållits genom VTI. Rapporten bygger på 11 stycken fallviktsmätningar som utfördes mellan maj och oktober 2011. Mellan perioden 20 juni-10 oktober var Lv 126, i vardera riktning, indelad i 19 mätpunkter med 10 meters intervaller. Mätdata från 11 maj samt 13 juni skiljer sig från övriga då fallviktsmätningarna endast är gjord i norrgående riktning på en sträcka av 22 meter och med en meters intervaller. I tabell 9 ses datumen då mätningarna är gjorda.

Tabell 9 - Datum för fallviktsmätningar gjorda under 2011.

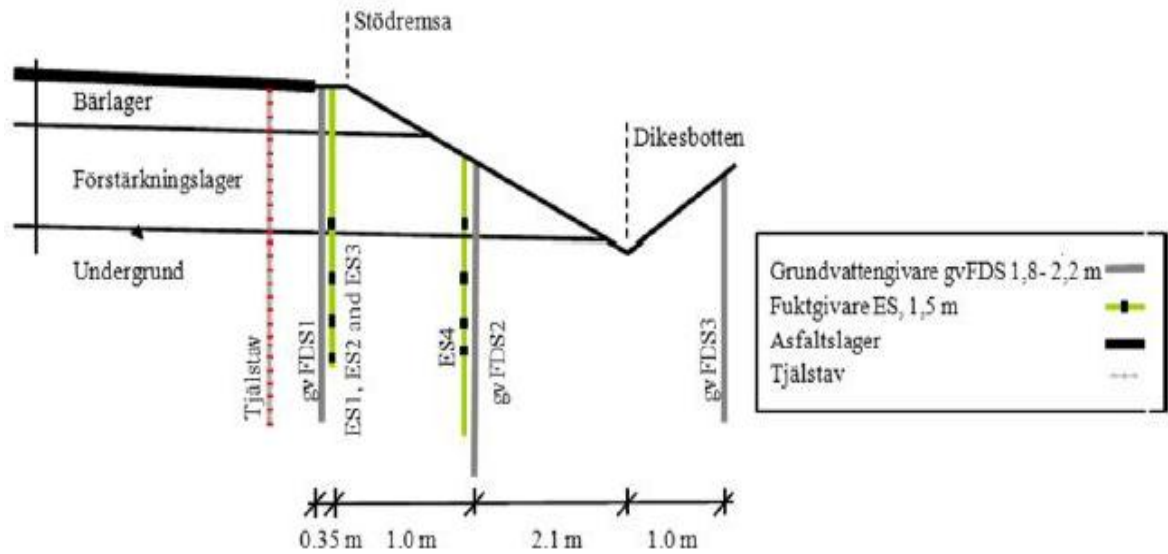
| Månad | Datum | Längd (m) |
|-----------|---|--------------|
| Maj | 11 ^c | 22 |
| Juni | 13 ^c , 20 ^c | 22 (180+180) |
| Juli | 4 ^c | 180 + 180 |
| Augusti | 1 ^a | 180 + 180 |
| September | 14 ^c , 16 ^c 19 ^c , 22 ^a , 26 ^c | 180 + 180 |
| Oktober | 13 ^c | 180 + 180 |

På mätsträckan finns 4 stycken fukthaltsmätare, ES1, ES2, ES3 och ES4 utplacerade som figur 33 visar. Dessutom är grundvattenrör, dräneringsrör och punkter för fallviktsmätningar från 20^e juni till 13^e oktober markerade. I figur 33 finns även fallviktspunkterna för 11e maj och 13e juni utmärkta.



Figur 33 - Fallviktsmätningar. I den översta bilden motsvarar de svarta punkterna de fallviktsmätningar som är gjorda den 11 maj och 13 juni. (Baserad på Salour & Erlingsson, 2012). I den undre bilden motsvarar kryssen mätningarna som är gjorda alla övriga datum (Baserad på Erlingsson & Salour, 2011).

Figur 34 illustrerar vägens tvärsnitt samt mätinstrumentens läge och avstånd från vägkanten.



Figur 34 - Skiss över vägenstvärsektion (ej skalenlig) (Hansson et al., 2012).

I området fanns även ett flertal manuella och automatiska grundvattensgivare installerade vilka har använts bl.a. för att utvärdera de förändringar som sker på grund av igensättningsförsöket. Dessa grundvattensmätare (GW1, GW2 och GW3) var placerade i en linje tvärs vägen, från beläggningkant i stödremsan och ut mot diket på ömse sidor av vägen, se figur 33. Grundvattenrören var öppna och den automatiska loggningen var avsedd att mäta snabba förändringar som kan ske exempelvis vid regnskurar (Hansson et al., 2012).



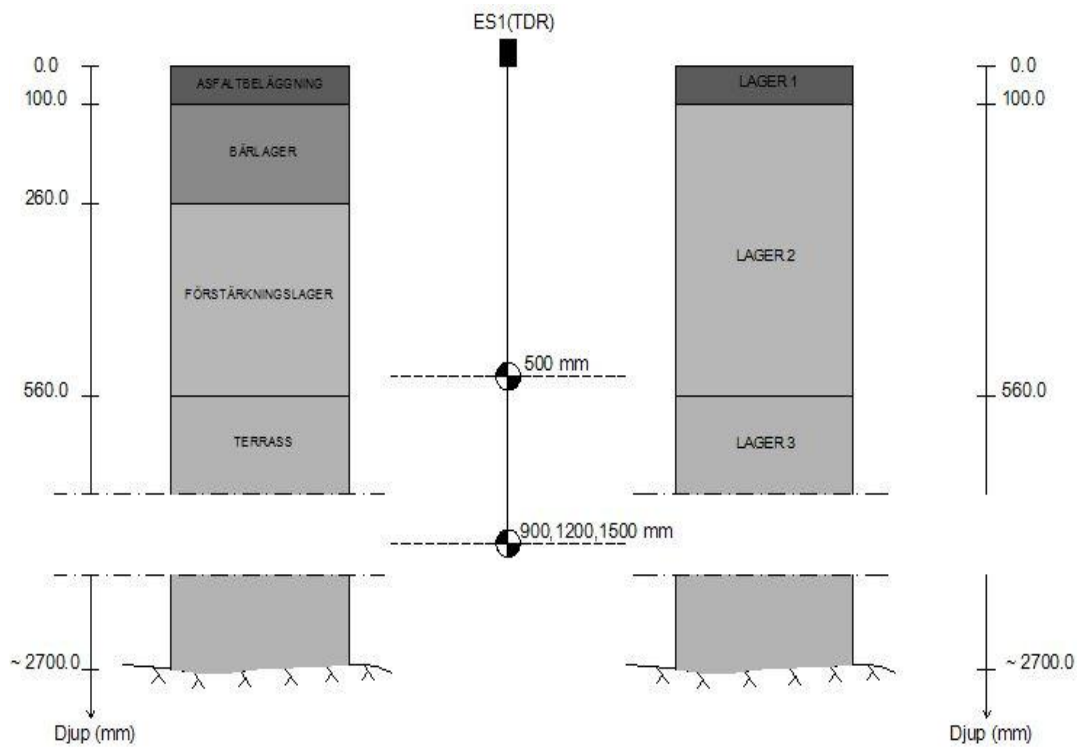
Figur 35 - Bild på Fukthaltsgivare (Salour & Erlingsson, 2012).

Alla TDR instrument var utrustade med fyra sensorer placerade på olika djup från vägytan. I Figur 35 visas staven med fukthaltsgivarna. Som framgår ur figur 33 har även en vattentät presenning installerats på platsen där två av fukthaltsgivarna ligger under duken (ES1 och ES2) och de två andra ligger utanför (ES3 och ES4). Detta för att kunna jämföra fukthaltsförändringar på olika djup i väggroppen under olika förutsättningar, dels vid en direkt påverkan av nederbörd och dels vid en fördröjning som konsekvens av tätningen med plastduk (Hansson et al., 2012).

De värden på fukthaltsmätningarna som används i denna rapport kommer från mätare ES1 som ligger i vägrenen under presenningen och ES3 som även den ligger i vägrenen fast utanför presenningen. Fukthaltsgivare ES3 är mer känslig för nederbörd på grund av infiltration genom markytan. ES1 påverkas inte lika starkt utav detta på grund av att plastduken förhindrar att vatten tränger in i väggroppen genom markytan. Anledningen till att ES2 och ES4 inte användes var för att dessa inte fungerade under studieperioden. Figur 36 visar hur plastduken är placerad mot innerslätten. Fukthaltens mätvärden registrerades automatiskt var 30:e minut genom ett datasystem placerat på ett visst avstånd från vägkanten (Salour & Erlingsson, 2012). Figur 37 visar sensorernas placering för ES1 och ES3 i förhållande till Lv 126 uppbyggnad.



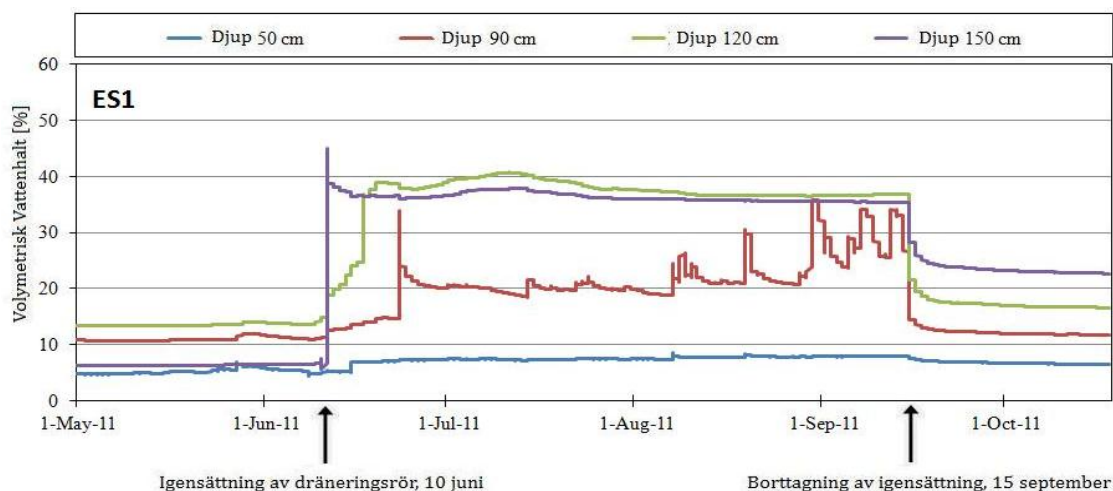
Figur 36 - Tätning av innerslät med duk (Hansson et al., 2012)



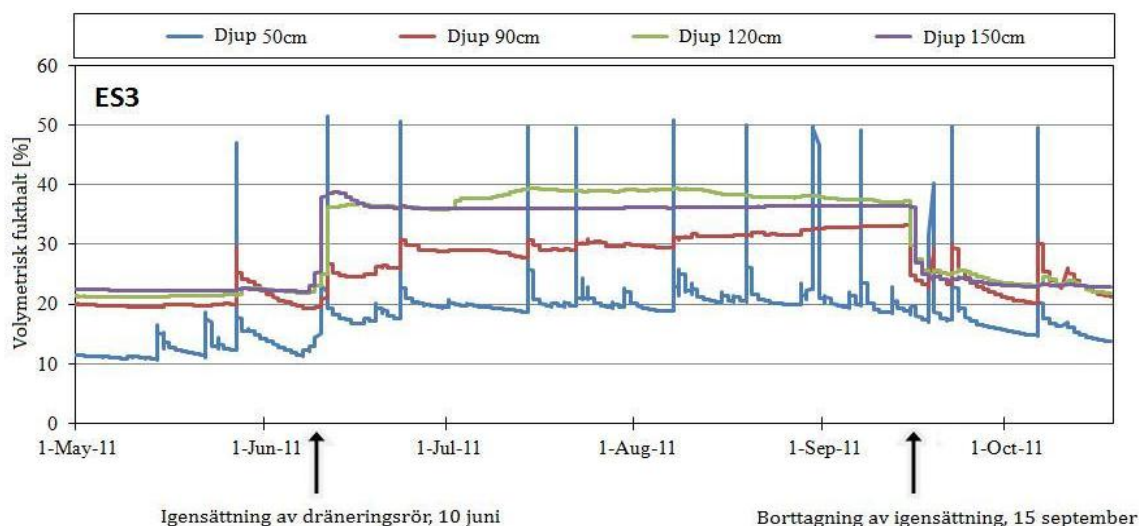
Figur 37 - Skiss över ES1 sensorers placering i förhållande till vägens uppbyggnad. Figuren till vänster representerar vägens uppbyggnad medan figuren till höger är den förenklade modellen använt i EVERCALC.

Vid installation av foderröret till fuktmätningstrustningen gjordes en skruvborrning i marken varefter röret sänktes ned i det öppna hålet. Detta tillvägagångssätt innebar att omgivande material inte låg an mot foderröret från början, men det antogs att materialet med tiden skulle kompakteras kring röret till följd av rörelser i materialet orsakade av trafik och tjäle/tjällossning (Hansson et al., 2012).

Mätningar från vattenhaltsgivaren ES1 och ES3 under maj till oktober visas i figur 38 respektive figur 39. Y-axeln motsvarar den volymetriska vattenhalten.



Figur 38 - Vattenhaltens variation på olika djup för ES1 (Hansson et al., 2012).



Figur 39 - Vattenhaltens variation på olika djup för ES3 (Hansson et al., 2012).

För både fukthaltsmätare ES1 och ES3 syns en tydlig ökning av fukthalten på djup 120 cm och 150 cm när igensättning av dränering sker. Under hela igensättningsperioden ligger fukthalten i princip på ett konstant värde. När dräneringen åter fungerar sjunker fukthalten snabbt igen. Anledningen är troligtvis att marken på detta djup är vattenmättad. Ökningen av fukthalten på 90 cm sker inte lika snabbt vid igensättningen. När dräneringen är avstängd ökar fukthalten långsamt under hela igensättningsperioden och sjunker åter igen när dräneringen fungerar. Denna långsamma fukthaltsökning beror troligtvis på kapillaritet i jordmaterialet då grundvattenytan ligger strax under. På 50 cm djup påverkas inte fukthaltsmätare ES1 då den är övertäckt av en presenning. De höga toppar som uppkommer med jämna mellanrum på 50 cm djup för ES3 beror på att mätaren ligger utanför den vattentäta duken och därför påverkas av nederbörd.

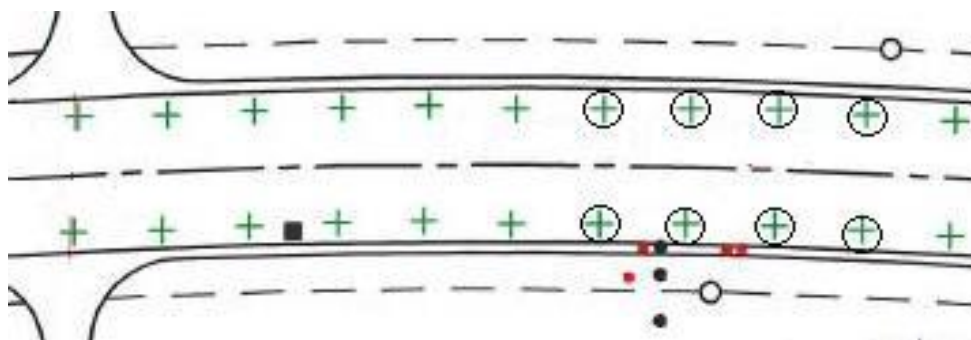
5. Resultat

I följande kapitel presenteras hur beräkningsgången har gått till samt vilka antaganden och förenklingar som har gjorts i samband med användning av programmet EVERCALC. Beräkningar är gjorda för alla mätdatum som är listade i Tabell 9 och resultat både från bakåtbereäkningar och från deflektionsindex presenteras.

5.1 Beräkningsgång

För att kunna beräkna väggkroppens styvhet under sommaren och hösten 2011 behövdes resultat från fallviktsmätningar och programmet EVERCALC. Fallviktsutrustningen som användes vid mätningarna var en KUAB 50 med sju sensorer och en lastplatta med radie 15 cm. I varje mätpunkt gjordes 2 nedsläpp vardera med last på 30 kN, 50 kN och 65 kN. Resultaten i denna rapport är beräknade med normaliserade deflektionsvärden från det andra slaget med lasten 50 kN. Anledningen till att denna last valdes är för att det motsvarar en standardaxel som är beskrivet i kap. 2.3.4.

Av de fallviktsmätningar som var gjorda valdes åtta mätpunkter ut för att få en hanterbar mängd data (tre punkter för datumen 11 maj och 13 juni då dessa punkter var de enda som sammanföll med övriga mätningar). Mätdata från alla använda punkter och datum finns i Bilaga 1. Ett av målen med beräkningarna var att kunna jämföra förändring i styvhet med förändring i fukthalt. Därför valdes åtta punkter i närheten av fukthaltsutrustningen för att kunna få så korrekta värden att jämföra som möjligt. Dessa punkter visas i figur 40:



Figur 40 - De inringade kryssen markerar de åtta fallviktsmätningar som valdes vid beräkningarna. För 11 maj och 13 juni användes endast tre punkter, vilka sammanfaller med tre av de ovan markerade mätningarna (Baserad på Erlingsson & Salour, 2011).

Deflektionerna från de åtta mätpunkterna matades in i EVERCALC tillsammans med information om fallviktsutrustningen, vägens uppbyggnad och materialegenskaper. Detta gjordes för alla mätdatum. Några förenklingar av vägens uppbyggnad fick göras för att få rimliga resultat. Eftersom bärlager och förstärkningslager har likartade egenskaper och EVERCALC inte ger bättre resultat med två tunna lager sammanslogs bärlager (16 cm) och förstärkningslager (30 cm) till ett gemensamt lager på 46 cm. Asfaltlagret matades in till 10 cm. Ett styvt lager i form av berggrund antogs ligga på relativt grunt djup och matades in som ett understa lager. Inverkan av ett styvt lager innebär att terrassen inte längre låg på ett oändligt djup utan endast gick ner till berggrunden.

Vid definiering av lageruppbyggnad i EVERCALC behövs ett intervall av styvheter i de olika lagren om inte ett fast värde anges. Eftersom asfaltens styvhet varierar med temperatur var asfaltens temperatur tvungen att bestämmas innan ett rimligt styvhetsintervall kunde anges. För att kunna uppskatta temperaturen i asfaltbeläggningen och därmed dess styvhet gjordes ett par antaganden. Det första antagandet var att temperaturen i mitten av asfaltlagret representerade hela asfaltlagrets egenskaper. Andra antagandet som gjordes var att temperaturen var betydligt lägre i mitten av lagret än vid ytan. Vid temperaturmätningarna var endast yttemperaturen uppmätt och dessa var gjorda mellan kl. 12-13 i samband med fallviktsmätningarna. I tabell 10 visas en uppskattning av asfaltens temperatur med utgångspunkt från yttemperaturen:

Tabell 10 - uppskattning av asfaltens temperatur med utgångspunkt från yttemperaturen

| Yttemperatur [°C] | Temperatur i mitten av asfaltlagret [°C] |
|-------------------|--|
| 30-40 | 22 |
| 25-29 | 19 |
| 20-24 | 17 |
| 15-19 | 14 |
| 10-14 | 9 |
| 5-9 | 4 |

Med hjälp av temperaturer och ekvation 12 kunde en uppskattning av asfaltens styvhet göras. Det beräknade värdet på styvheten användes som initialvärde för asfaltlagret i EVERCALC för varje mätdatum. Värdena visas i tabell 11:

Tabell 11 - Asfaltens styvhet för varje mätdatum

| Datum | Yttemperatur [°C] | Mittemperatur [°C] | Initiell Elasticitetsmodul [MPa] |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------------------------|
| 11 maj | 32 | 22 | 2980 |
| 13 juni | 31 | 22 | 2980 |
| 20 juni | 31 | 22 | 2980 |
| 4 juli | 25 | 19 | 3621 |
| 1 augusti | 35 | 22 | 2980 |
| 14 september | 17 | 14 | 5012 |
| 16 september | 22 | 17 | 4121 |
| 19 september | 21 | 17 | 4124 |
| 22 september | 19 | 14 | 5012 |
| 26 september | 19 | 14 | 5012 |
| 13 oktober | 13 | 9 | 6934 |

Vägens strukturella tillståndsförändring vid igensättningsförsök
Fernando Cruz del Aguila & Madeleine Direnius

För alla lagren i vägkonstruktionen matades ett intervall för styvheten in i EVERCALC förutom på berggrunden som fick ett fast värde på 3500 MPa. Dessutom angavs för varje lager ett värde på Poissons tal. Tabell 12 ger en överblick på de värden som användes vid beräkningen i EVERCALC.

Tabell 12 - Värden för bakåtberäkning. Siffrorna är baserade på tabell 7.

| Lager | Poissons tal | Initial Modul [MPa] | Intervall för Modul [MPa] |
|-----------------------------|--------------|---------------------|---------------------------|
| Asfalt | 0,32 | Tabell 11 | - |
| Bärlager+Förstärkningslager | 0,35 | 200 | 120-350 |
| Terrass | 0,40 | 150 | 80-200 |
| Berggrund | 0,30 | 3500 | - |

Vid körning av programmet beräknades en styvhet ut för varje mätpunkt och lager. Resultatet blev därmed 8 olika värden för styvheten på varje lager. För att kunna utvärdera resultatet togs värden som verkade orimliga bort från slutresultatet och därefter beräknades ett medelvärde som fick representera lagrets styvhet. Denna beräkningsgång gjordes för alla datum som fallviktsmätningar var gjorda.

Vid beräkning i EVERCALC ges, i samband med resultatet av elasticitetsmodulen, även det RMS-fel som uppstod. I alla beräkningar som är gjorda ligger detta procentuella fel på mellan 1-2 procent.

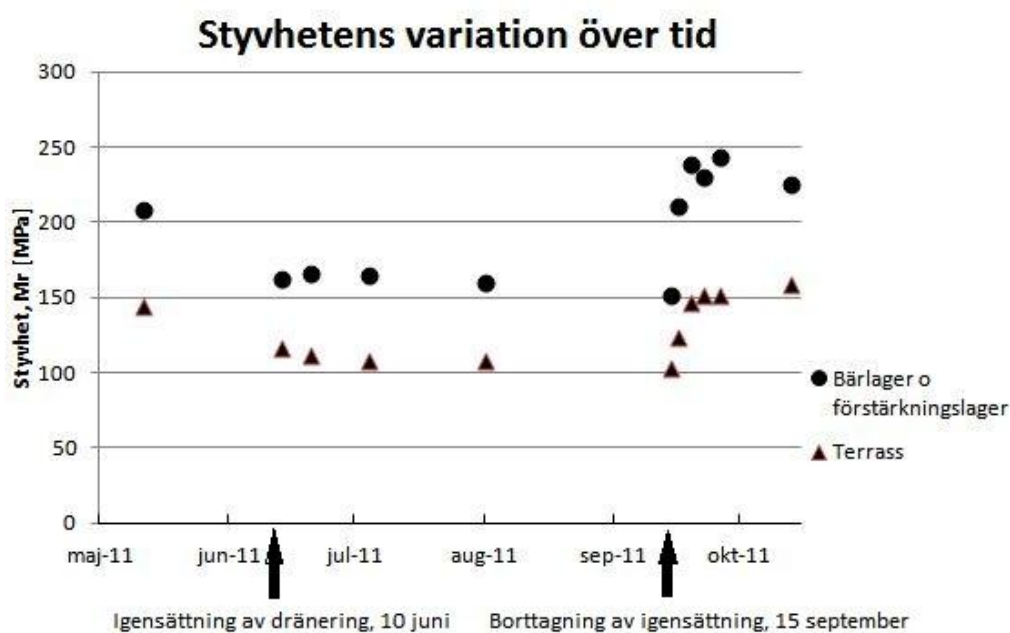
5.2 Vägens bakåtberäknade styvheter

Styvheterna som beräknades med hjälp av EVERCALC visas i tabell 13. I alla beräkningar visade det sig dessutom att berggrunden låg på cirka 2,8–3,2 meters djup.

Tabell 13 - Tabellen visar hur styvheten varierar över tiden i bärlager/förstärkningslager och terrass.

| Datum | Bärlager/Förstärkningslager [MPa] | Terrass [MPa] |
|-------|-----------------------------------|---------------|
| 11/5 | 208 | 144 |
| 13/6 | 162 | 116 |
| 20/6 | 166 | 111 |
| 4/7 | 164 | 108 |
| 1/8 | 160 | 108 |
| 14/9 | 151 | 103 |
| 16/9 | 211 | 124 |
| 19/9 | 238 | 146 |
| 22/9 | 230 | 151 |
| 26/9 | 243 | 151 |
| 13/10 | 225 | 159 |

I figur 41 visas bärlagret/förstärkningslagrets samt terrassens styvhet i ett diagram för att få en bättre överblick av förändringen över tid.



Figur 41 – Styvhet i bärlager/förstärkningslager samt i terrassen över tid.

Som syns i figur 41 sjönk styvheten i både bärlager/förstärkningslager och i terrass under sommarmånaderna. Dräneringen stängdes av den 10 juni och direkt syntes en tydlig styvhetsförlust. Under hela perioden då dräneringen var igentäppt låg styvheten på ungefär samma nivå, relativt långt under styvhetsvärdet innan dräneringen stängdes av. När dräneringen öppnades den 15 september återhämtade sig styvheten snabbt igen. För bärlager/förstärkningslager hamnade styvheten snabbt på ett värde mellan 230-240 MPa. Terrassens styvhet steg till 159 MPa men låg fortfarande på en tillväxt vid provningens slut.

För att beskriva vägens bärighetsförlust under höga fukthalter har minskningen av styvheten för vardera lagret beräknats. För att få fram styvhetsminskningen har, för varje lager, skillnaden mellan den högsta och lägsta styvheten beräknats. Den procentuella styvhetsminskningen har tagits fram utifrån dessa värden. Resultaten visas i tabell 14:

Tabell 14 - Förlorad styvhet under höga fukthalter.

| Lager | Högsta styvhet [MPa] | Lägsta styvhet [MPa] | Förlorad styvhet [%] |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Bärlager/Förstärkningslager | 243 | 151 | 38 |
| Terrass | 159 | 103 | 35 |

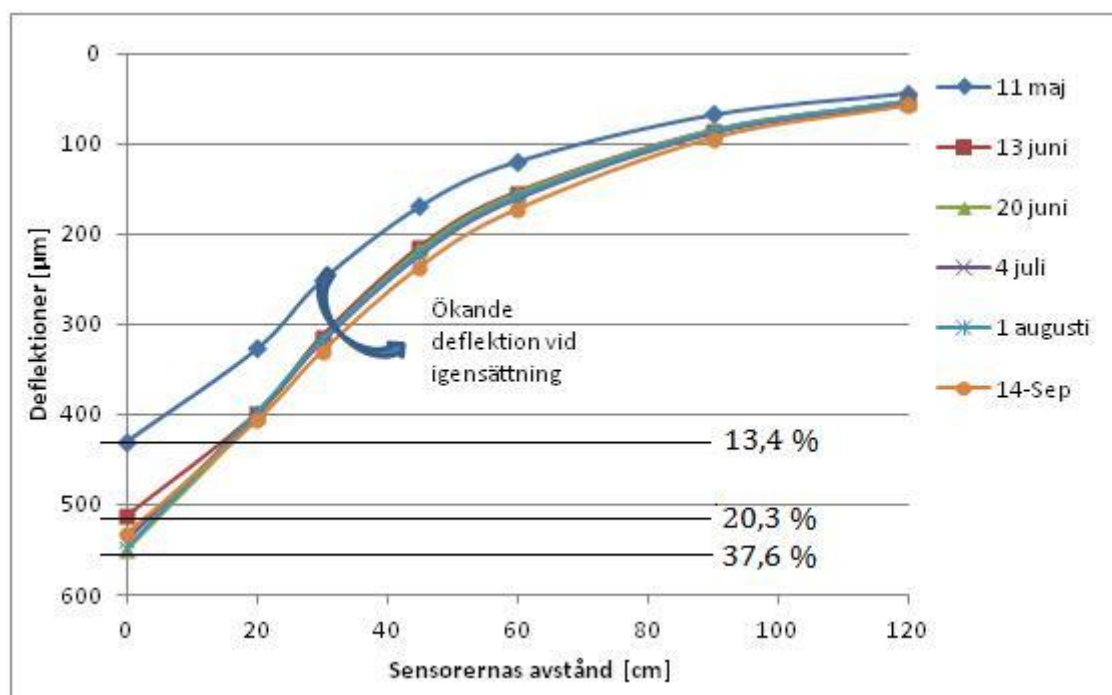
Den lägsta styvheten (151 MPa) i bärlager/förstärkningslager uppmättes den 14 september, det vill säga under den sista mätningen med tilltäppt dränering. Den högsta styvheten (243 MPa) uppmättes den 26 september. Skillnaden mellan den högsta och lägsta styvheten i bärlager/förstärkningslager hamnar på 92 MPa. När styvheten är som lägst har den alltså sjunkit med 38 %, jämfört med styvhetens maximala värde.

Precis som för bärlager/förstärkningslager uppmättes den lägsta styvheten för terrassen (103 MPa) den 14 september. Den högsta styvheten (159 MPa) uppmättes den 13 oktober, alltså under det sista mätdatumet. Kurvan för terrassen tyder även på att styvheten fortfarande ligger på en tillväxt vid denna tidpunkt. Skillnaden mellan den högsta och lägsta styvheten i terrassen hamnar på 56 MPa. När styvheten är som lägst har den alltså sjunkit med 35 %, jämfört med styvhetens maximala värde.

5.3 Deflektionernas förändring

Resultatet från fallviktsmätningarna kommer i form av deflektioner i vägytan. Ett högt värde på deflektionerna innebär att vägytan deformeras mer än vid ett lägre värde. Genom att rita upp de uppmätta deflektionerna i grafer kan en överblick av deformationsegenskaperna fås utan att göra några avancerade beräkningar. I figur 42 och 43 visas hur deflektionerna förändras över tiden då mätningarna är gjorda.

I figur 42 visas en graf över deflektionerna mellan datumen 11 maj-14 september, det vill säga innan och under igensättningen. Det syns tydligt att deflektionerna ökar när dräneringen inte längre fungerar och vägkroppen har förhöjda fukthalter. För att visa att fukthalten har betydelse för deflektionerna har den inkluderats i figur 43. De horisontella linjerna i figuren beskriver alltså fukthalten. Linjerna utgår från den maximala deflektionen och motsvarar fukthalten på 120 cm djup för fukthaltsmätare ES1. Det datum fukthaltslinjen korsar på y-axeln motsvarar alltså det datum fukthalten är uppmätt.



Figur 42 – Medelvärde av deflektionerna innan och under igensättningen, samt den volymetriska fukthaltens förändring.

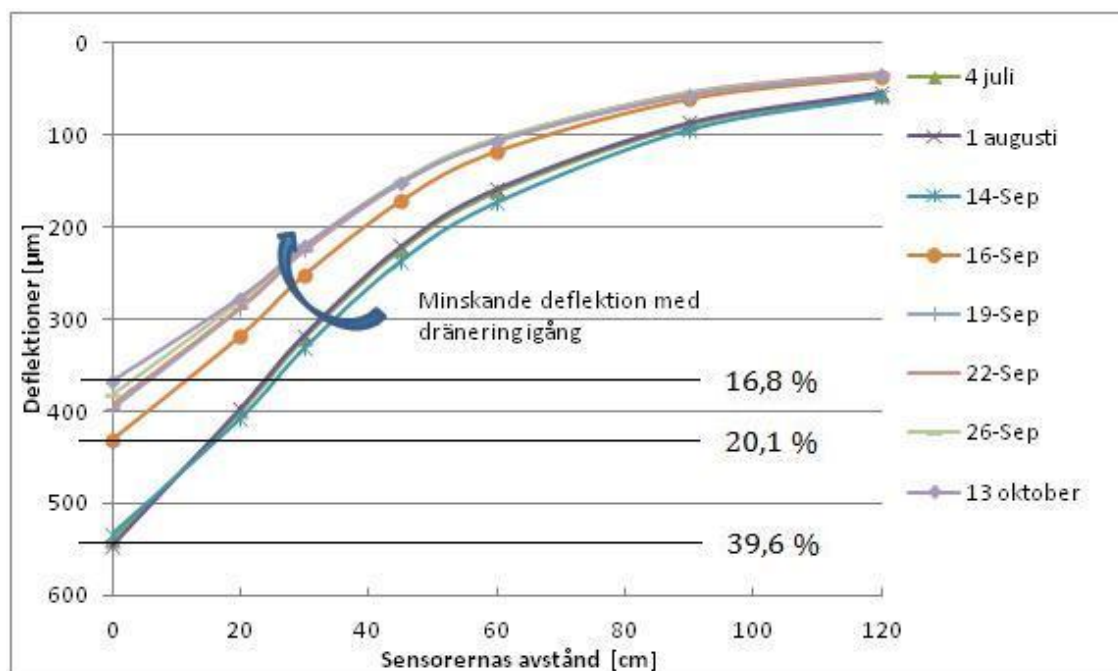
I figur 42 syns det tydligt att deflektionen är som lägst i maj då också den volymetriska fukthalten ligger på 13,4 %. Under igensättningsperioden stiger deflektionen samtidigt som fukthalten ökar. Under igensättningsperiodens sista dagar ligger deflektionerna som högst samtidigt som den volymetriska fukthalten har ökat till 37,6 %. I tabell 15 visas förändringen av den maximala deflektionen, D_0 innan och under igensättningen.

Tabell 15 – Förändring av den maximala deflektionen före och under igensättning.

| Min D_0 | Max D_0 | Förändring D_0 |
|-----------|-----------|------------------|
| 430 | 547 | 27,2 % |

Den maximala deflektionen, D_0 ökar med 27,2 %. Det vill säga att ökningen nästan uppgår till 1/3 av den ursprungliga deflektionen. Bara genom att studera deflektionerna kan en styvhetsförlust konstateras, men inte var någonstans i väggkroppen den uppkommer.

I figur 43 visas en graf över deflektionerna mellan datumen 4 juli- 13 oktober, alltså under igensättningen och perioden därefter då dräneringen fungerar igen. Det syns även i denna graf tydligt hur deflektionerna minskar när fukthalten sjunker och går tillbaka mot normala värden. Fukthalterna i figuren är uppmätta på 120 cm djup för fukthaltsmätare ES1. Det datum fukthaltslinjen korsar på y-axeln motsvarar alltså det datum fukthalten är uppmätt, precis som i föregående figur.



Figur 43 – Medelvärdet av deflektionerna under och efter igensättningsperioden, samt den volumetriska fukthaltens förändring.

I figur 43 syns det att deflektionen är som högst i slutet av igensättningsperioden då också den volymetriska fukthalten ligger högt på 39,6 %. När dräneringen åter igen fungerar sjunker deflektionerna samtidigt som fukthalten sjunker. På det sista mät datumet den 13 oktober ligger deflektionerna som lägst och fukthalten har då sjunkit till 16,8 %. I tabell 16 nedan visas förändringen av den maximala deflektionen, D_0 under och efter igensättningen.

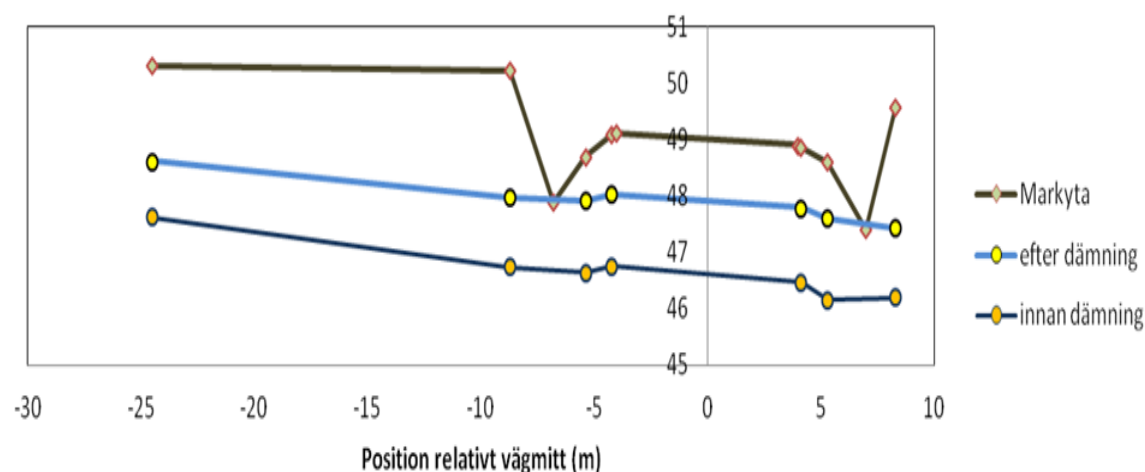
Tabell 16 – Förändring av den maximala deflektionen under och efter igensättning.

| Max D_0 | Min D_0 | Förändring D_0 |
|-----------|-----------|------------------|
| 550 | 368 | 33,1 % |

Den maximala deflektionen, D_0 minskar med ungefär 33 %. Det vill säga att när dräneringen åter igen fungerar sjunker den maximala deflektionen med ungefär 1/3. Bara genom att studera deflektionerna kan en styvhetstillväxt konstateras när dräneringen åter igen fungerar.

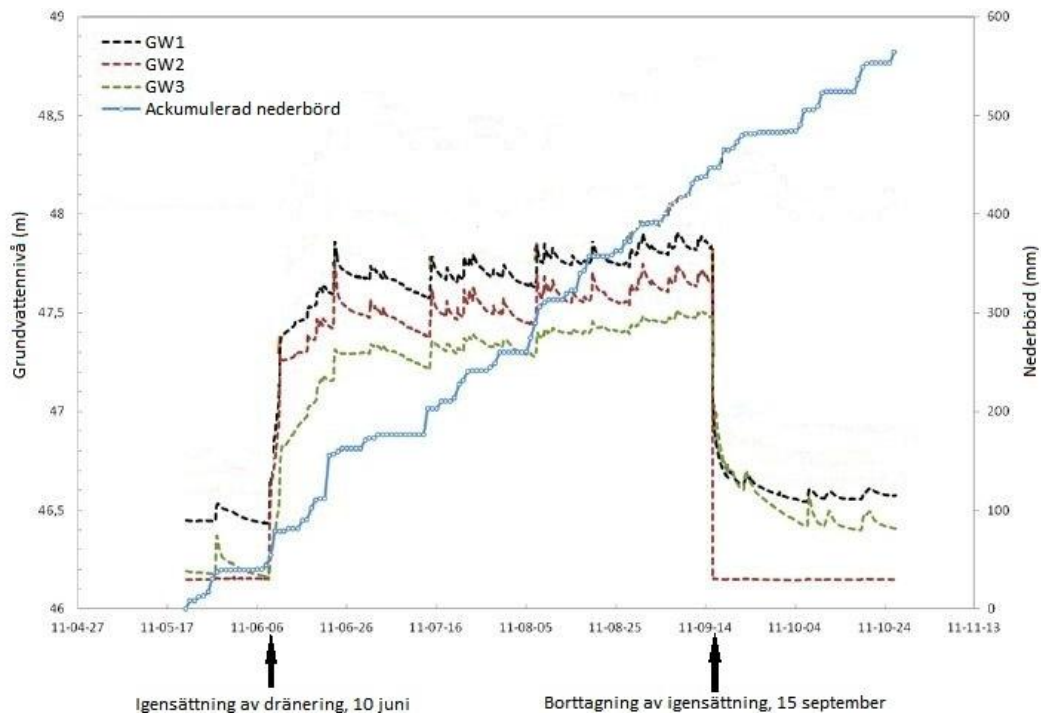
5.4 Grundvattenytans variation

Genom mätningar kunde grundvattenytans nivå studeras under studieperioden. Det visade sig att grundvattenytan höjdes under tiden då dräneringen var igensatt. I figur 44 visas grundvattenytans förändring vid igensättningsförsöket. Den vertikala axeln beskriver placering av markytan och grundvattenytan i meter mätt. Ur figur 44 kan det utläsas att markytan ligger på en höjd av 49 meter och att grundvattenytan låg på strax under 47 meter innan igensättningen. När dräneringen inte fungerade steg grundvattennivån till 48 meter. Det vill säga att den totala grundvattenhöjningen blev ungefär 1,5 meter och att grundvattenytan efter igensättningen endast låg en meter under marknivå.



Figur 44 - Grundvattennivåns förändring vid igensättningsförsöket. Punkterna visar de grundvattensmätare som var placerades tvärs vägen (Hansson et al., 2012).

Från figur 45 ges en tydligare bild över hur grundvattenytan betar sig över hela den studerade perioden. I figuren finns grundvattenmätningar från GW1, GW2 och GW3. I grafen finns även en kurva som representerar den ackumulerade nederbörden som har fallit på platsen. Mätningarna är gjorda från mitten av maj till mitten av oktober.

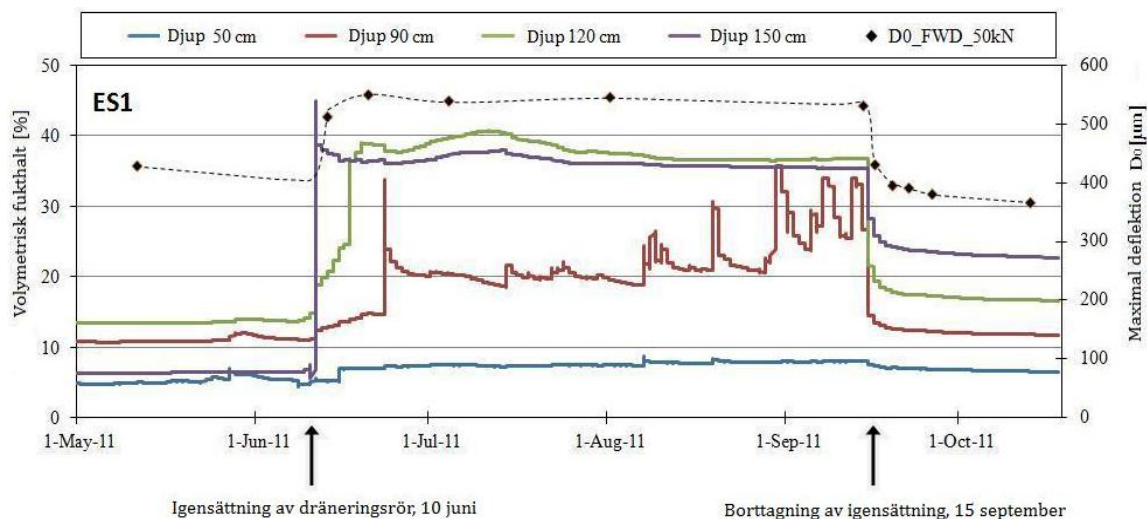


Figur 45 - Grundvattenytans variation under den studerade perioden (Hansson et al., 2012).

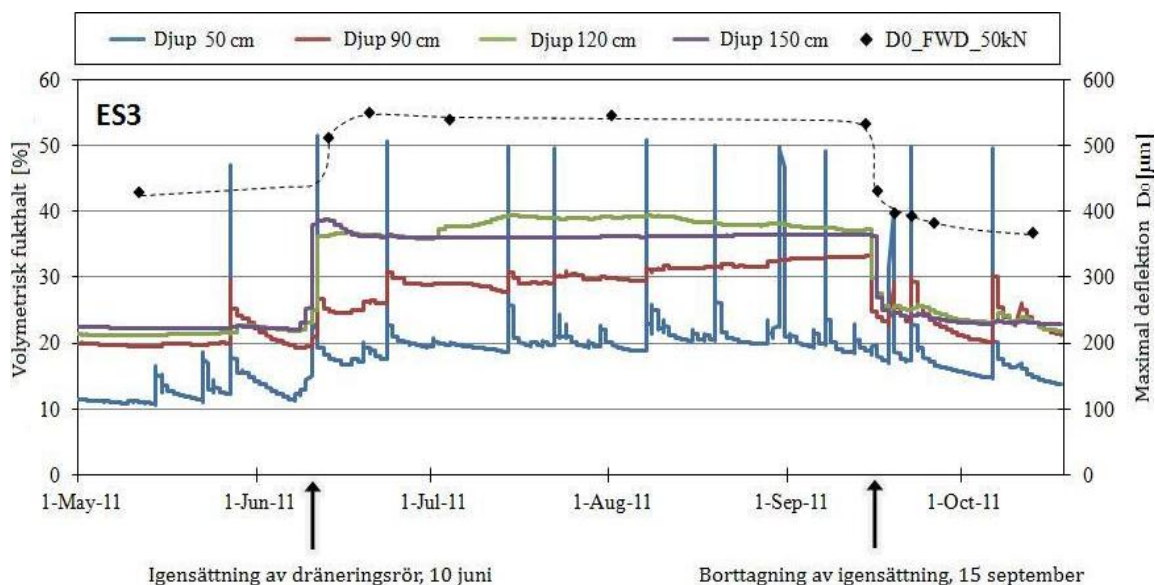
Det syns tydligt att grundvattenytan för alla mätpunkter stiger snabbt i samband med att dräneringen sätts igen. När dräneringen åter igen fungerar sjunker grundvattenytan. Skillnaden i grundvattenytans nivå är drygt 1,5 meter. Som även syns i figur 45 har det regnat relativt mycket under mätperioden.

5.5 Beräknade deflektionsindex

Deflektionsindex ger en indikation på hur styvheten varierar i olika delar utav vägkonstruktionen (se tabell 2). I figur 46 och 47 visas förhållandet mellan fukthalt och den maximala deflektionen för ES1 och ES3.



Figur 46 - Fukthalten och maximal deflektion (D_0) för ES1 (Hansson et al., 2012).

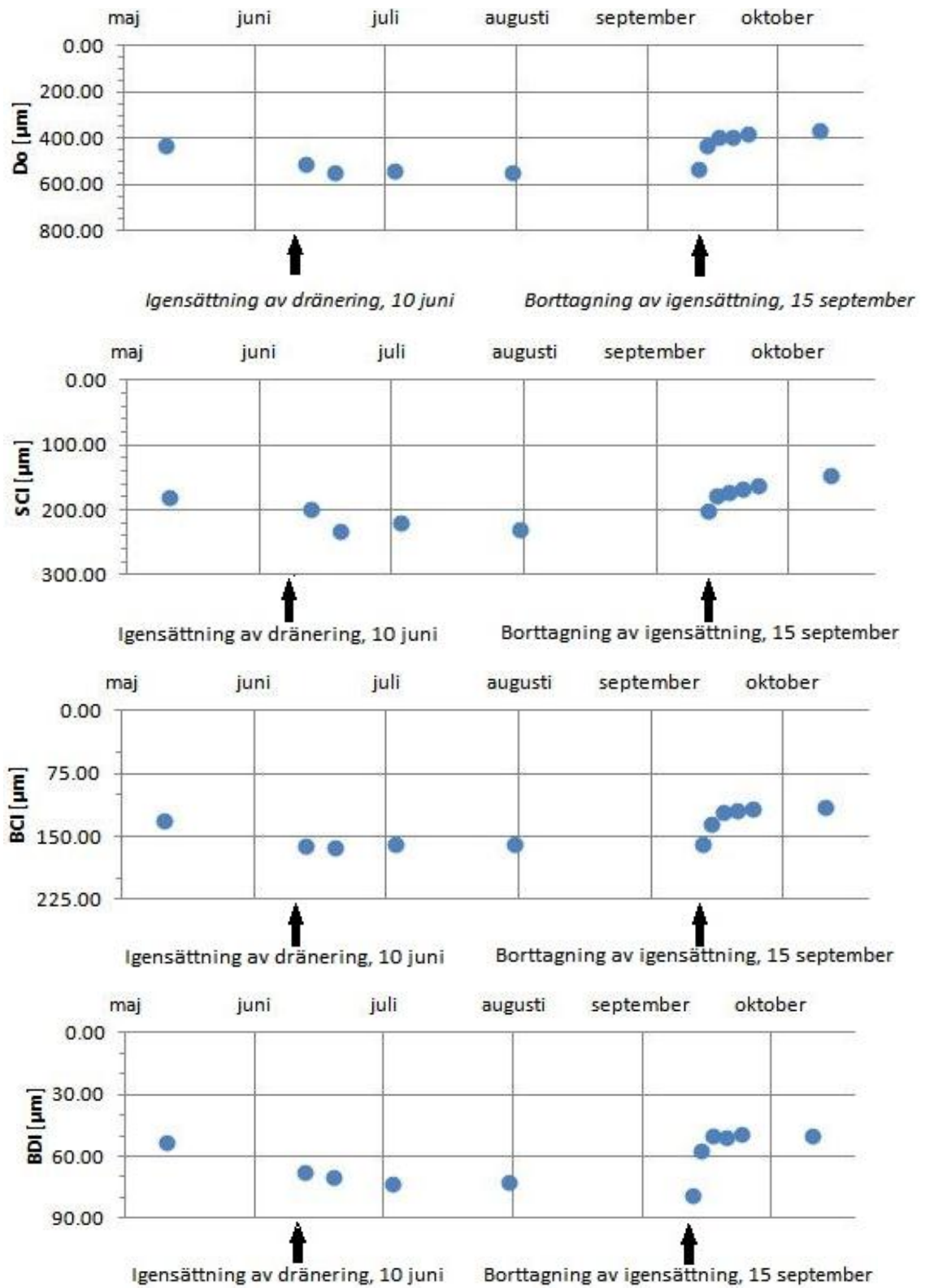


Figur 47 - Fukthalten och maximala deflektion (D_0) för ES3 (Hansson et al., 2012).

Vid jämförelse av figur 46 och 47 syns en tydlig skillnad mellan fukthaltslinjerna som motsvaras av ett djup på 50 cm. För fukthaltsgivare ES3, som tillåter infiltrering av nederbörd, syns en koppling mellan nederbörd och en snabb förhöjning av fukthalt på djupet av 50 cm. Topparna som ligger med jämna mellanrum för fukthaltsgivare ES3 uppkommer alltså på grund av regnskurar. För ES1 ligger fukthalten på 50 cm djup relativt konstant under hela igensättningsperioden. I övrigt syns att fukthalten ökar under igensättningsperioden och att maximala deflektionen ökar under samma period.

Vägens strukturella tillståndsförändring vid igensättningsförsök
Fernando Cruz del Aguila & Madeleine Dörenius

I figur 48 visas grafer över alla beräknade deflektionsindex.



Figur 48 - Deflektionsindex för Lv 126.

I samtliga grafer är indexen som högst under igensättningsperioden då även fukthalten ligger på sitt maxvärde. När dräneringen åter igen fungerar sjunker indexen samtidigt som fukthalten går tillbaka mot normala värden.

BCI står för styvheten i bärlager/förstärkningslager. I figur 48 syns att indexen ökar vid igensättning och håller sig konstanta ända till dess att dräneringen fungerar igen. Det maximala värdet uppnås den 20 juni och fram till den 13 oktober sjunker BCI med 30 %. BDI står för styvheten i terrassen. I figur 48 syns att BDI ökar vid igensättning och sedan långsamt försätter att öka under hela igensättningsperioden. Det maximala värdet uppmäts den 14 september. Från 14 september till 13 oktober sjunker BDI med 36 %.

5.6 Jämförelse av resultat

5.6.1 Bakåtberäknad styvhet vs deflektionsindex

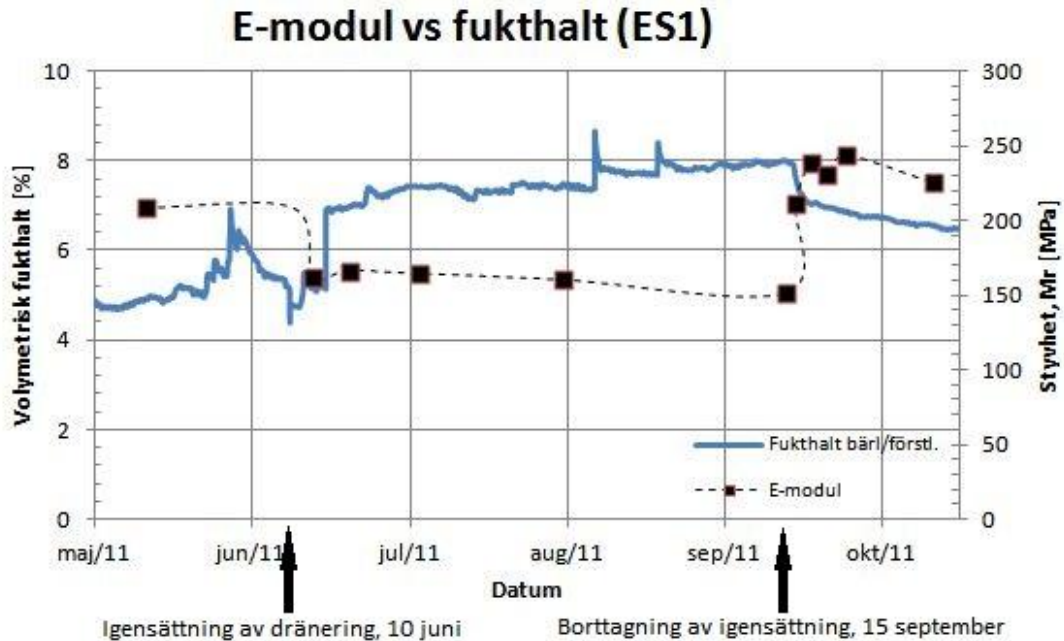
BCI har sitt maximala värde den 20 juni, vilket borde innebära att styvheten i bärlager/förstärkningslager är som lägst vid denna tidpunkt. Detta stämmer inte riktigt överens med den bakåtberäknade styvheten för bärlager/förstärkningslager. Den lägsta styvheten i bakåtberäkningen uppstod den 14 september. Det bör dock kommenteras att deflektionsindexen mellan den 13 juni och 14 september var i princip konstanta och att det endast skiljde ett par μm mellan värdena. BCI har sitt lägsta värde den 13 oktober och borde innebära att styvheten i bärlager/förstärkningslager då ligger på sitt maximala värde. Inte heller detta stämmer överens med de bakåtberäknade styvheterna eftersom den maximala styvheten beräknades till den 26 september. BDI har sitt maximala värde den 14 september vilket borde innebära att styvheten i terrassen är som lägst då. Detta stämmer bra överens med de bakåtberäknade styvheterna eftersom terrassens styvhet ligger på det lägsta värdet vid denna tidpunkt. Den 26 september och 13 oktober har BDI i princip samma värde. Dessa dagar motsvarar även de datum då det lägsta värdet på BDI inträffar. Även detta stämmer väl överens med de bakåtberäknade styvheterna eftersom den högsta styvheten inträffar den 13 oktober.

5.6.2 Jämförelse mellan fukthalt och grundvattenytta

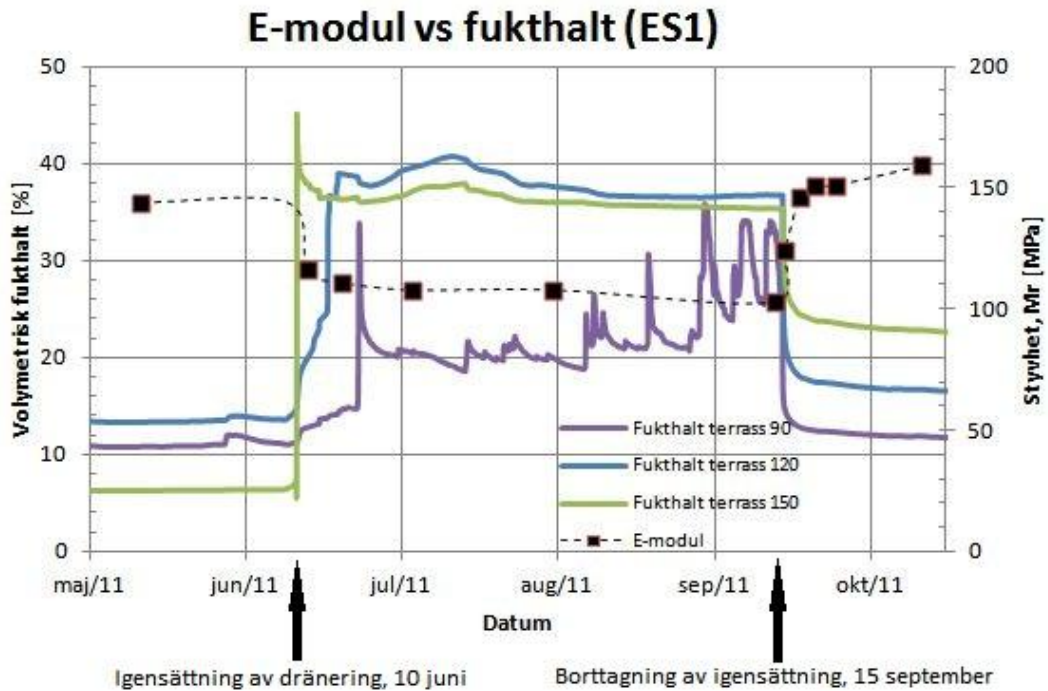
Fukthalten ökade markant efter igensättningen och enligt samma trend ökade även grundvattenytan, se figur 38 och figur 45. Både fukthalten och grundvattenytan höll sig på ett relativt konstant värde under hela igensättningsperioden. När dräneringen sedan fungerade igen sjönk både fukthalten och grundvattenytan snabbt ner till ett värde som låg lite högre än startvärdet. Profilerna för både grundvattenytan och fukthalten ser i princip likadana ut. Från figur 44 kunde det utläsas att grundvattennivån låg en meter under marknivå under igensättningsperioden. Detta innebär att fukthaltsmätarnas sensorer på 120 samt 150 cm djup låg under grundvattenytan under denna period. I figur 38 och 39 syns tydligt att fukthalten under igensättningsperioden ligger på ett högt och konstant värde vilket därför kan konstateras bero på att de ligger i en vattenmättad zon. Ur dessa figurer kunde också utläsas att sensorerna på 90 cm djup visade på en långsam fukthaltsökning under hela igensättningsperioden som kunde tänkas bero på kapillaritet. Antagandet att höjningen beror på kapillaritet kan nu stärkas eftersom grundvattenytan endast ligger 10 cm under denna sensor. Det finns alltså en tydlig koppling mellan fukthalt och grundvattenytans nivå.

5.6.3 Styvhetens variation i förhållande till fukthalt

Nedan visas två grafer som representerar bärlager/förstärkningslager samt terrassen för fukthaltsmätare ES1. Både fukthalten och styvheten är inritade för att kunna se sambandet mellan dessa två. Fukthalten i terrassen är den uppmätta från djupet av 90, 120 och 150 cm. Se figur 49 och 50:



Figur 49 - Bärlager/Förstärkningslagers styvhet och fukthaltens variation för ES1.

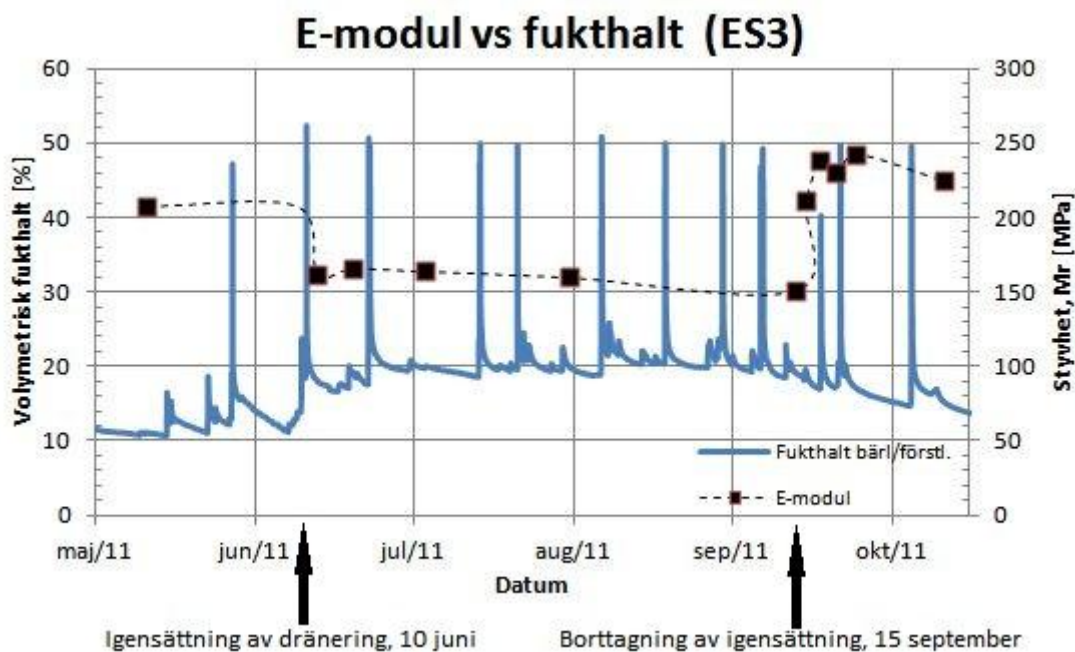


Figur 50 - Terrassens styvhet och förändring i fukthalt för ES1.

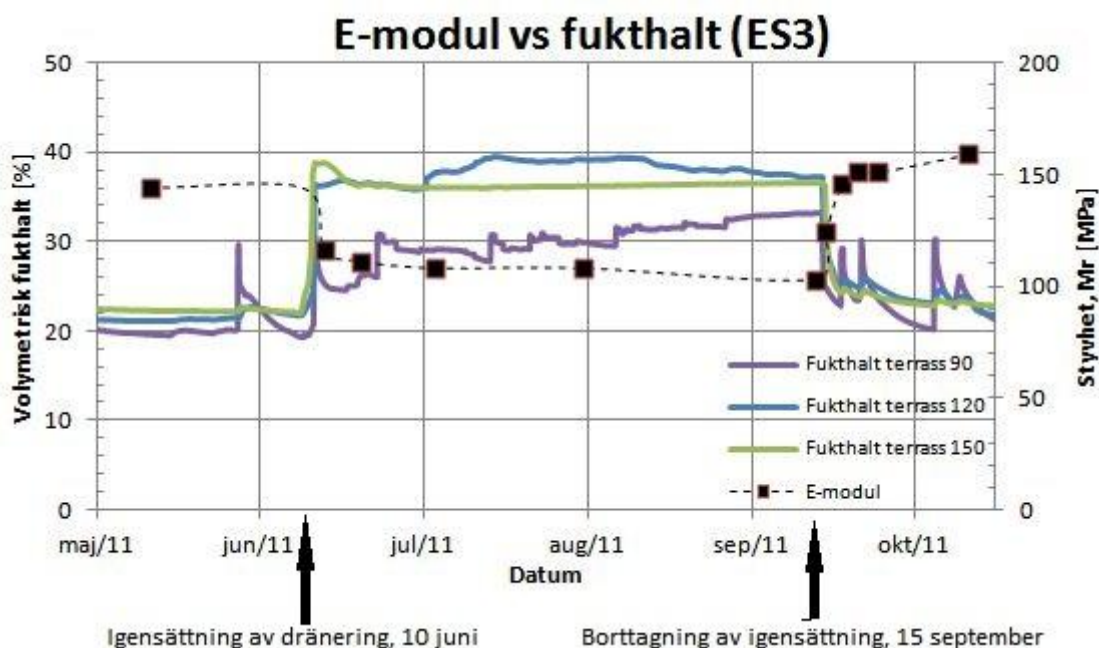
För både bärlager/förstärkningslager och terrass syns ett tydligt samband mellan fukthaltens ökning och vägkroppens styvhetsförlust. När fukthalten ökar sjunker styvheten och den håller sig relativt konstant fram till dess att fukthalten sjunker igen. På djupet 50 cm för ES1 stiger den volymetriska fukthalten direkt med 2 % -enheter när dräneringen sätts igen. Under igensättningsperioden stiger fukthalten långsamt upp till drygt 8 %. När dräneringen fungerar igen sjunker fukthalten snabbt ner till 7 % och fortsätter sedan att sjunka långsamt under resterande mätningar. Det syns en tydlig koppling mellan styvhetens variation och fukthaltens variation i bärlager/förstärkningslager. När dräneringen stängs av sjunker styvheten med cirka 50 MPa och fortsätter sedan att sjunka långsamt i samband med att fukthalten stiger. När dräneringen sedan fungerar igen stiger styvheten snabbt upp till de ursprungliga värdena.

I terrassen på 150 cm djup stiger den volymetriska fukthalten från 6 % till över 40 % direkt när dräneringen stängs av. På ett djup av 120 cm stiger fukthalten från 12 % till 38 % med en liten tidsfördröjning efter igensättningen. På 90 cm djup är fördröjningen i systemet längre och fukthalten får sin topp först ett par veckor efter igensättningen. Styvheten i terrassen sjunker direkt vid igensättning och fortsätter sedan att sjunka under hela igensättningsperioden. Direkt när dräneringen fungerar igen stiger styvheten till ett högre värde än utgångsvärdet. Fukthalten på 50, 120 och 150 cm djup ligger relativt konstanta under hela igensättningsperioden, medan fukthalten på 90 cm djup är mer oregelbunden med höga toppar.

Figur 51 och figur 52 representerar bärlager/förstärkningslager samt terrassen för fukthaltsmätare ES3. Både fukthalten och styvheten är inritade för att kunna se sambandet mellan dessa två. Fukthalten i terrassen är den uppmätta från djupet av 90, 120 och 150 cm.



Figur 51 - Bärlager/Förstärkningslagars styvhet och fukthaltens variation för ES3.



Figur 52- Terrassens styvhet och förändring i fukthalt för ES3.

På djupet 50 cm för fukthaltsmätare ES3 syns inte en lika tydlig fukthaltsökning vid igensättning som för ES1. Fukthaltsmätare ES3 ligger utanför den vattentäta presenningen och påverkas därför mer av nederbörd. Den volymetriska fukthalten stiger från 12 % till drygt 20 % vid igensättning och har toppar som går upp emot 50 % med jämna mellanrum. Sambandet mellan fukthalt och styvhet är inte lika tydlig som för fukthaltsmätare ES1.

Innan igensättningen låg den volymetriska fukthalten i terrassen på 90, 120 och 150 cm djup på drygt 20 %. När dräneringen sedan stängdes av steg fukthalten på 120 och 150 cm djup till cirka 37 % och på 90 cm djup steg fukthalten till 28 %. De volymetriska fukthalterna på 120 och 150 cm djup ligger relativt konstant under hela igensättningsperioden och sjunker direkt när dräneringen fungerar igen. Fukthalten på 90 cm djup stiger långsamt under hela igensättningsperioden och har ett maximalt värde på 33 %. Det syns en tydlig koppling mellan styvhetens variation och fukthalten även för mätare ES3.

En tydlig skillnad som observeras mellan fukthaltsmätare ES1 och ES3 är att både startvärdena på fukthalterna och slutvärdena på fukthalterna skiljer sig mycket åt. Fukthalterna för både bärlager/förstärkningslager och terrass är överlag högre på fukthaltsmätare ES3.

5.6.4 Fukthaltsmodell

För att ytterligare beskriva förhållandet mellan fukthalt och styvhet används den så kallade fukthaltsmodellen som är beskriven i kapitel 3.2.3. Parametrarna som behövs för att rita en kurva för de beräknade förhållandena är ett referensvärde för elasticitetsmodulen samt ett referensvärde för fukthalten, som bör vara det optimala värdet. I figur 41 syns att styvheten i terrassen under oktober månad fortfarande ligger på en uppåtgående trend. Därför valdes ett referensvärde för terrassens styvhet till ett lite högre värde än det beräknade värdet för oktober månad. I bärlager/förstärkningslager sätts styvhetens referensvärde till samma styvhet som beräknades för oktober månad.

För att uppskatta ett referensvärde för fukthalten i terrassen studerades förändringarna under hela året. Det visade sig att fukthalten i terrassen på 150 cm djup hela tiden låg på ett konstant värde på drygt 6 %. Den optimala fukthalten brukar dock vara lite högre än det normala värdet. Därför valdes ett referensvärde som ligger lite högre än det uppmätta värdet. Vattenmättnadsgraden för terrassen beräknades utifrån den volymetriska fukthalten och porositeten. Det finns dock inga uppmätta värden för porositeten i terrassen utan beräkningarna som är gjorda i detta kapitel bygger därför på antaganden. Terrassen består av siltig sand och enligt Das (2010) ligger normala porositetsvärden för en sådan jordart mellan 0,29- 0,39 beroende på kompaktionsgraden. Därför har vi gjort två olika beräkningar för terrassen, en med $n = 0,39$ och en med $n = 0,29$.

För bär- och förstärkningslager beräknades vattenmättnadsgraden utifrån den volymetriska fukthalten, tungheten och den specifika vikten. Tungheten för materialet uppskattades vara $20,5 \text{ kN/m}^3$ och specifika vikten antogs vara 2,7. I tabell 17 och 18 visas en sammanställning av de valda parametrarna för fukthaltsmodellen.

Tabell 17 - Använda materialparametrar till fukthaltsmodellen för terrass.

| Lager och djup | θ_v [%] | Sref (Hårt packat) [%] | Sref (Löst packat) [%] |
|----------------|----------------|------------------------|------------------------|
| Terrass 90 cm | 11,2 | 20,0 | 17,6 |
| Terrass 120 cm | 13,1 | 23,3 | 20,6 |
| Terrass 150 cm | 10 | 17,8 | 15,7 |

Tabell 18 - Använda materialparametrar till fukthaltsmodellen för bär- och förstärkningslager.

| Lager | θ_v [%] | Sref [%] |
|---------------------------------|----------------|----------|
| Bärlager och Förstärkningslager | 5,2 | 22,9 |

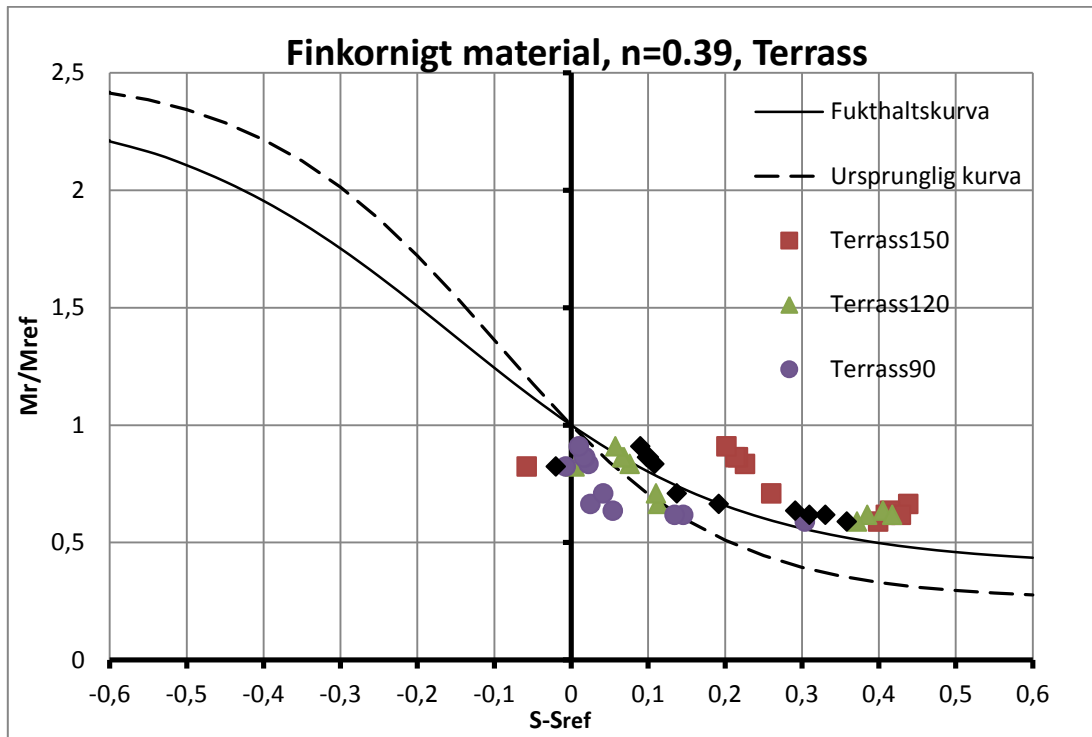
Som beskrivet i tidigare kapitel finns det rekommenderade värden på parametrarna i ekvation 13 för att få fram en fukthaltsmodell. Vilka värden som bör användas beror på om det är grovkorniga eller finkorniga material. En kurva för terrassens beräknade värden ritades upp tillsammans med fukthaltskurvan för ett finkornigt material. Dessa kurvor stämde inte riktigt överens med varandra och för att få en kurva som representerar de beräknade värdena justerades parametrarna från tabell 6. De slutgiltiga värdena presenteras i tabell 19.

Tabell 19 - Rekommenderade värden för parametrar i ett finkornigt material samt använda värden.

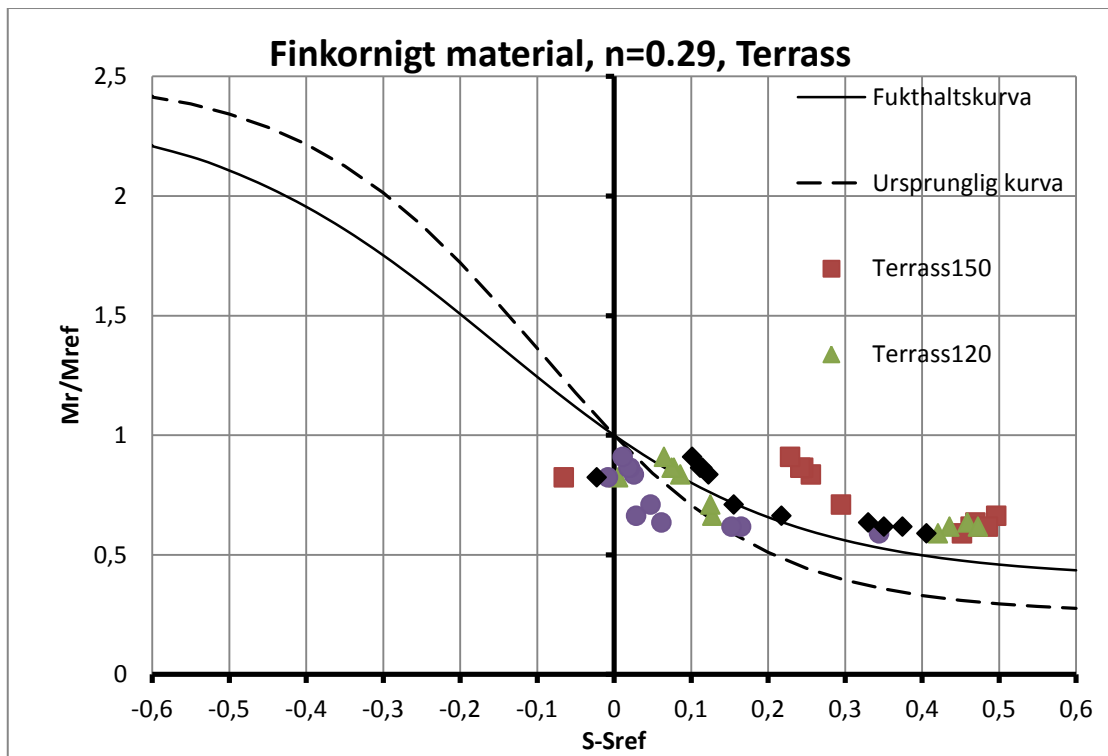
| Parameter | Ursprungliga värden | Använda värden |
|-----------|---------------------|----------------|
| a_m | -0,5930 | -0,4 |
| b | 0,4 | 0,38 |
| β | -0,39 | -0,0513 |
| k_s | 6,1324 | 5 |

Eftersom de tre fukthaltsmätningarna på djupen 90, 120 och 150 cm alla motsvaras av terrassen har alla dessa mätningar tagits med i terrassens fukthaltsmodell. Trots att det finns fukthalter uppmätta på varje djup i terrassen finns det endast en gemensam styvhet beräknad. Det innebär att värdet på M_r/M_{ref} är detsamma för alla djup i terrassen medan vattenmättnadsgraden har olika värden beroende på djup. I figur 53 och 54 visas fukthaltskurvorna för ett löst packat material samt för ett hårt packat terrassmaterial. De olika punktkombinationerna motsvaras av uppmätta värden för de tre olika djupen i terrassen. Dessutom är ett medelvärde av alla punkterna beräknat och det är denna linje som är bäst anpassad till fukthaltsmodellen.

Med värden från tabell 19 fås följande grafer för löst packat respektive hårt packat terrassmaterial:

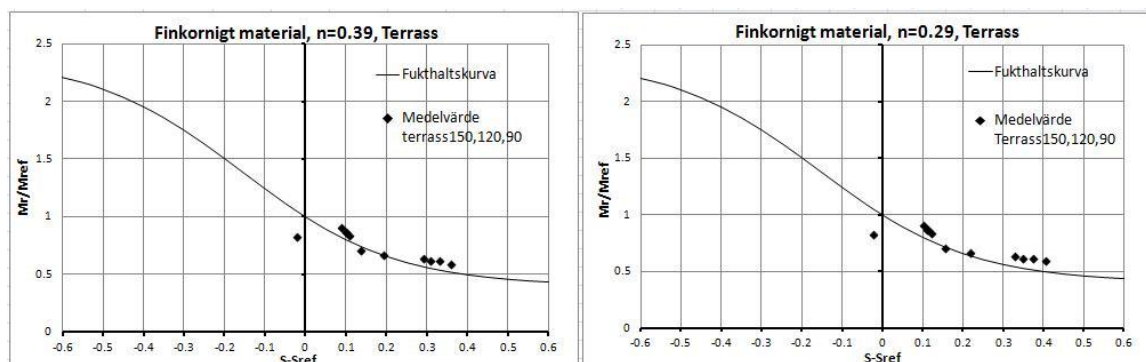


Figur 53 – Fukthaltsmodell för löst packat terrassmaterial. Både den ursprungliga fukthaltsskurvan (streckad) och den valda kurvan med ändrade parametrar är inritade.



Figur 54 – Fukthaltsmodell för hårt packat terrassmaterial. Både den ursprungliga fukthaltsskurvan (streckad) och den valda kurvan är inritade.

Figur 53 och 54 visar att den ursprungliga kurvan inte passar mätpunkterna särskilt bra. Kurvan med de ändrade parametrarna passar relativt bra för mätpunkterna, både för det löst packade och hårt packade terrassmaterialet. För att tydligare visa hur väl fukthaltskurvan är anpassad för mätdata, visas i figur 55 kurvorna endast med medelvärdena inritade.



Figur 55 – Fukthaltskurvor för terrassen med endast medelvärdena inritade.

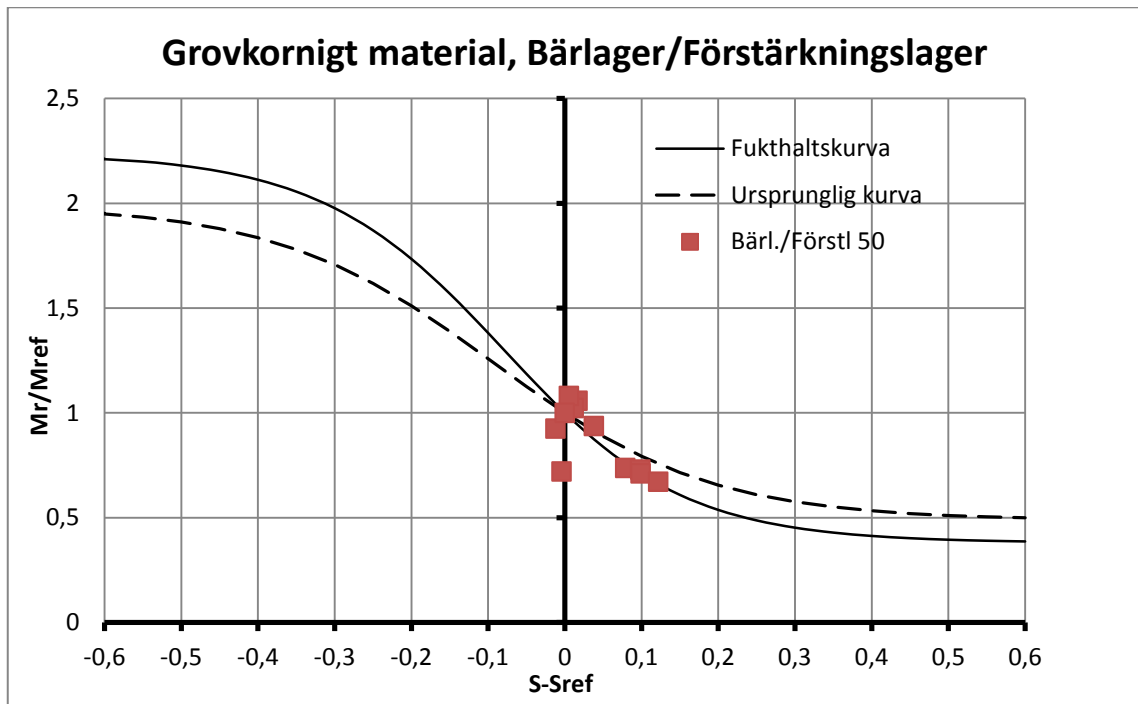
Fukthaltsmätningarna i bär- och förstärkningslager är gjorda i den allra nedersta delen av lagret, på 50 cm djup från vägytan mätt. Mätningen är alltså gjord endast 6 cm ovanför terrassens yta (asfalt+ bär- och förstärkningslager är totalt 56 cm). Den fukthalt som representerar hela bär- och förstärkningslager är troligtvis inte fukthalten som är uppmätt i nedersta delen av lagret utan snarare i mitten. Antagligen har fukthalten ett lägre värde högre upp i bär- och förstärkningslagret och därför har den uppmätta fukthalten minskats med drygt 1 % - enhet. Detta antagande gäller för de mätningar som är gjorda efter att dräneringen är påsatt igen eftersom terrassen då innehåller en stor mängd fukt och kan påverka den nedre delen av bär- och förstärkningslagret.

Precis som för terrassen fick fukthaltskurvan för bär- och förstärkningslager justeras för att passa ihop med de uppmätta värdena. De justerade värdena visas i tabell 20:

Tabell 20 - Rekommenderade värden för parametrar i ett grovkornigt material samt använda värden

| Parameter | Ursprungliga värden | Använda värden |
|-----------|---------------------|----------------|
| a_m | -0,3123 | -0,42 |
| b | 0,3 | 0,35 |
| β | -0,04 | -0,182 |
| k_s | 6,8157 | 8 |

Med värden från tabell 20 fås följande graf för ett grovkornigt material:

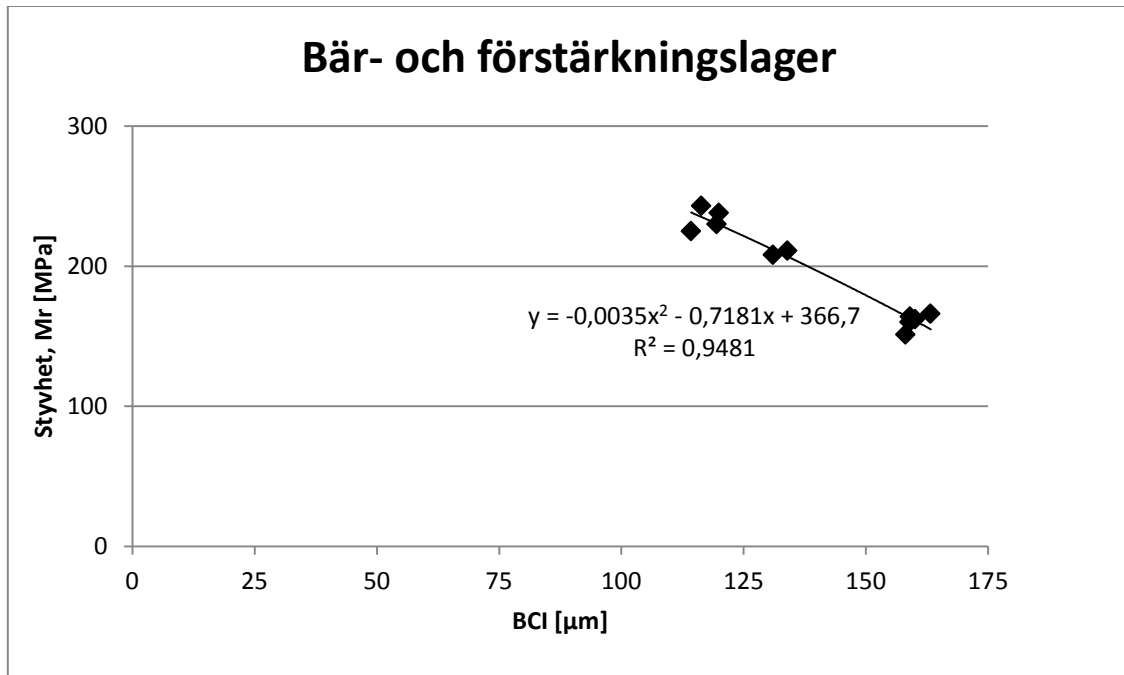


Figur 56 – Fukthaltsmodell för ett grovkornigt material. Både den ursprungliga fukthaltsskurvan (streckad) och den valda kurvan är inritade.

I alla figurer ovan motsvarar den högra sidan av horisontella axeln ett blött material och den vänstra sidan motsvarar ett torrt material. Den vertikala axeln motsvarar förhållandet mellan den beräknade modulen och referensvärdet. Vid värden lägre än ett på den vertikala axeln innebär att styvheten är lägre än referensvärdet. I alla figurer syns att styvheten minskar vid förekomst av ett blött material.

5.6.5 Styvheter som funktion av deflektionsindex

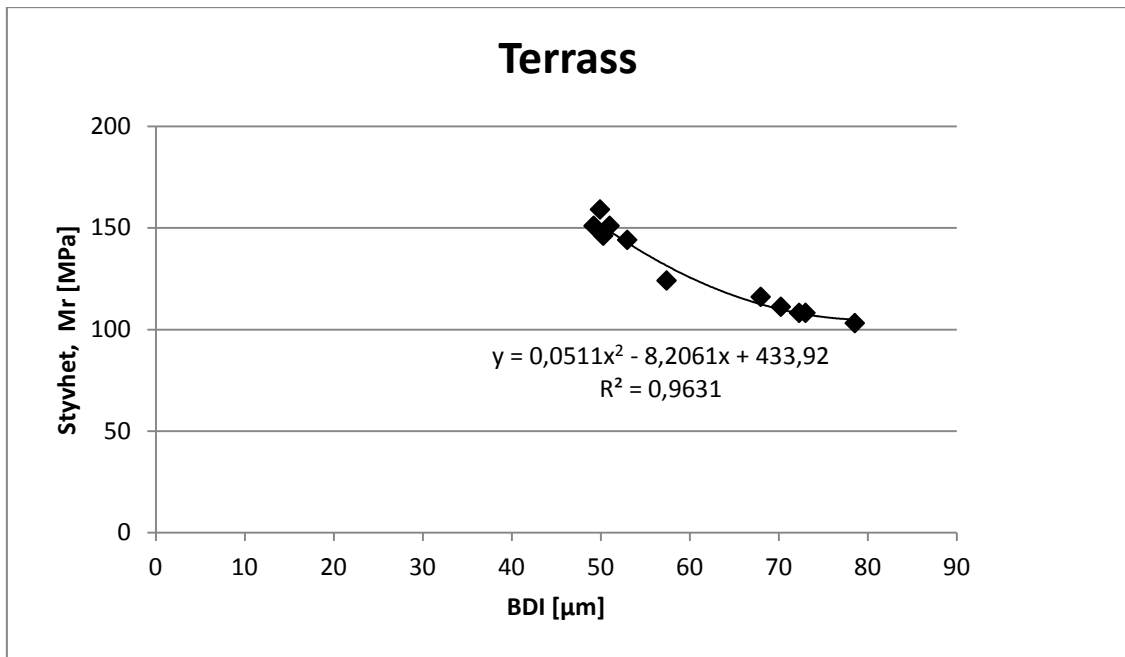
För att ytterligare jämföra deflektionsindex med styvheten för respektive lager har de plottats mot varandra för att på så sätt hitta ett samband. Som beskrivet i föregående kapitel ger BCI en indikation på styvheten för det mellersta partiet i en vägkonstruktion. I denna rapport görs därför antagandet att BCI motsvarar styvheten för bär- och förstärkningslagret. BDI ger i sin tur en indikation på styvheten i den nedre delen av vägkonstruktionen, vilket i detta fall får motsvara terrassen. I figur 57 visas en graf för bär- och förstärkningslagrets styvheter som en funktion av BCI för alla mätdatum.



Figur 57 - Styvheter som funktion av BCI för bär- och förstärkningslager. Trendlinjen motsvaras av ett andragradspolynom.

För att hitta bästa trendlinjen mellan mätpunkterna testades flera olika funktioner. Trendlinjernas ekvationer användes för att räkna ut nya styvheter och jämföra med de bakåtberäknade värdena. Från dessa värden kunde en standardavvikelse och korrelationsfaktor (R^2) beräknas, där korrelationsfaktorn är ett mått på hur väl en linje anpassar sig till data och ju närmare 1 den ligger desto bättre. Den trendlinje som hade bäst anpassning till mätvärdena var ett polynom av andra graden, med standardavvikelse på 8,1 MPa och $R^2 = 0,9481$.

I figur 58 visas en graf som motsvarar terrassens styvheter plottat som en funktion av BDI för alla mätdatum.



Figur 58 - Styvheter som funktion av BDI för terrassen. Trendlinjen motsvaras av ett andragradspolynom.

På samma sätt som för bär- och förstärkningslager har olika trendlinjer anpassats till mätdata. Den bästa anpassningen motsvarades av ett andragradspolynom med standardavvikelse på 4.1 MPa och $R^2 = 0,9631$.

6. Diskussion och slutsatser

Huvudmålet med detta examensarbete var att få en ökad förståelse för hur fukthalten i väggkroppen påverkar bärrighetsförmågan för Lv 126 utanför Torpsbruk. Detta har gjorts med hjälp av fallviktsmätningar samt fukthaltsmätningar under ett igensättningsförsök sommaren och hösten 2011. Mätdata analyserades med bakåtberäkningsprogrammet EVERCALC som är baserad på linjärelastisk teori. Dessutom analyserades mätdata med hjälp av deflektionsindex.

Som väntat visade resultatet att det fanns en tydlig koppling mellan höga fukthalter och styvhetsförlust i alla obundna lager. Bakåtberäkningarna visade att vägmaterialet som mest förlorade över 1/3 av sin styvhet och detta var när fukthalten hade sitt högsta värde. Den procentuella styvhetsförlusten var i princip densamma både för bärlager/förstärkningslager och för terrassen. Deflektionsindexen stämde bra överens med de bakåtberäknade resultaten, då även dessa visade på en minskad styvhet under höga fukthalter.

För att ytterligare hitta samband mellan fukthalten och styvheten användes fukthaltsmodellen där ett samband kunde konstateras. Parametrarna från den ursprungliga fukthaltsskurvan fick dock justeras för att passa ihop med de uppmätta styvhetsvärdena och fukthalterna. För terrassen anpassades mätpunkterna för medelvärdet mycket bra med fukthaltsskurvan. Även för bärlager/förstärkningslager kunde en fukthaltsskurva anpassas bra med de uppmätta värdena. Med utgångspunkt från fukthaltsskurvan kan en uppskattning av styvhetsförlust beräknas endast genom att veta fukthalten. För att även förstärka kopplingen mellan deflektionsindex och styvhet plottades dessa mot varandra. Styvheten för bär- och förstärkningslager plottades mot BCI och ett samband i form av ett andragsgradspolynom kunde hittas. På samma sätt hittades ett samband mellan terrassmaterialet och BDI och även där var sambandet i form av ett andragsgradspolynom. Meningen med ett sådant samband är att styvheten på ett enkelt sätt ska kunna utvärderas endast med hjälp av deflektionsindex. Båda modellerna är ett steg i rätt riktning för att kunna uppskatta styvheten i ett obundet material utan att göra alltför många mätningar och beräkningar.

Vid dimensionering av vägar idag, tar man indirekt hänsyn till fukthaltens variation under årstiderna med hjälp av tabeller enligt kap 3.2.1. Skillnaden mellan styvhetsvärdena i de olika lagren låg under sommar och tjällossningsperioden mellan 20-30 % enligt denna tabell. Fukthalten under tjällossningsperioden är antagligen högre än fukthaltsvärdena som är uppmätta i Torpsbruk under igensättningsperioden, men det är rimliga siffror att jämföra med. Våra resultat tyder på att styvheten i både bärlager/förstärkningslager och terrass sjunker med 38 % samt 35 % under igensättningsperioden.

Det bör kommenteras att en jämförelse mellan våra beräknade värden och tabellvärdena kanske inte ger en korrekt bild av verkligheten. I tabellerna spelar flera faktorer så som materialegenskaper och dräneringsgrad in. Våra uppmätta resultat tyder dock på en större skillnad i styvhetsförlust än vad tabellerna gör. Det kan vara möjligt att de resultat vi fått fram i denna rapport kommer ge upphov till en förändring av tabellerna i framtiden.

De slutsatser som kan dras från resultatet i denna rapport är att fukthalten har en väldigt stor betydelse för styvheten i en vägkonstruktion. Resultatet visade att vägen förlorar över 1/3 av sin styvhet under höga fukthalter vilket är en stor förlust. När styvheten sjunker blir eftergivligheten i vägmaterialet större. När en väg utsätts för trafiklaster uppstår det dragspänningar i underkant av asfaltbeläggningen och efter en viss tid uppkommer dragsprickor. Detta är ett händelseförlopp som utspelar sig i alla vägar oberoende fukthalt. Problemet med höga fukthalter och minskad styvhet i en väggropp, är att händelseförloppet med dragsprickor sker fortare och vägen får därmed förkortad livslängd. En annan orsak till förkortad livslängd för en väg är att höga fukthalter leder till större permanent deformation i väggroppen än vid låga fukthalter. Detta leder i sin tur till ökad spårbildning i vägens yta. Styvhetsförlusten hos en väg påverkar därmed i hög grad vägens standard men i längden innebär det också extra kostnader för drift och underhåll på grund av sprickor och spårbildning. Resultatet från denna rapport visar hur viktigt det är redan från början och under hela vägens livslängd, se till att dräneringen i vägkonstruktionen fungerar som den ska.

Något som dessutom bör kommenteras är att sambanden mellan fukthalter och styvheter som presenteras i denna rapport gäller för en enskild väg. Ännu en slutsats som kan dras utifrån detta är att värdena skiljer sig från objekt till objekt. Även ifall resultaten från denna rapport ger en indikation på vad som händer så krävs det fler testobjekt för att hitta ett gemensamt samband som bättre stämmer överens med verkligheten. Även om resultaten som presenteras i denna rapport är rimliga med utgångspunkt från teorin, finns det en viss osäkerhet både i mätningar och i beräkningar. Detta på grund av att det är många faktorer som har betydelse för slutresultatet. Under arbetets gång har vi funderat på hur våra antaganden och val av parametrar har påverkat resultatet. Nedan följer möjliga felkällor i rapporten.

Under arbetets gång har det inte funnits några gjorda laborationsundersökningar på vägens materialegenskaper. Därför har antagandet gjorts att egenskaperna för bärlager och förstärkningslager är ungefär likadana. Därmed gjordes även valet att sammanslå dessa till ett gemensamt lager i beräkningarna. Även terrassens kompaktionsgrad och porositet har på grund av bristande information endast blivit uppskattade.

Dessutom borde hänsyn tas till att marken troligtvis inte är homogen. Eftersom våra fallviktsmätningar är gjorda med flera meters intervaller skiljer sig markens egenskaper med största sannolikhet åt mellan dessa punkter, vilket skulle kunna påverka mätningarna. Även fukthaltsmätningarna skulle kunna vara påverkade av detta fenomen. Det finns även en viss osäkerhet med fukthaltsmätningarna för bär- och förstärkningslager på grund av att den översta sensorn var placerad 50 cm ner i marken. Detta innebär att sensorn låg precis i gränsen till terrassen vilket vi tror kan påverka mätningens trovärdighet. För att få ett värde på fukthalten som representerar bär- och förstärkningslagret på ett bättre sätt borde fukthaltsmätarens sensor istället ligga i mitten av lagret. En annan osäkerhet vad gäller fukthaltsmätningarna är att det fanns långsgående sprickor i vägens hjulspår. Det finns en risk att detta kan ha påverkat fukthaltsmätningarna genom infiltration.

Styvheterna beräknades med hjälp av bakåtberäkningsprogrammet EVERCALC och förväntade värden kom ut, alltså styvhetsminskning under höga fukthalter. Ifall värdena är korrekta är inget som kan konstateras men för att stärka trovärdigheten i resultatet skulle en icke-linjär analys kunna utföras. Utförandet av en sådan beräkning borde ge ett mer exakt värde på styvheterna och kan vara en idé för fortsatt utredning av rapporten.

När de beräknade styvhets- och fukthaltsvärden skulle sättas in i fukthaltsmodellen visade det sig att de inte alls passade in med den ”ursprungliga kurvan”. Att vi fick ändra parametrarna en hel del för att få en passande modell är vid närmare eftertanke inte så konstigt. Parametrarna i fukthaltsmodellen är framtagna från triaxiala tester från jordprover i USA. Det är mycket möjligt att egenskaperna från svenska jordarter och jordarter från USA inte stämmer överens med varandra. För att hitta en kurva som stämmer överens med svenska förhållanden borde tester göras och en egen kurva tas fram för detta. Denna rapport är helt enkelt bara en liten del av det som krävs för att få fram bra modeller för att kunna förutspå styvhetsminskning på grund av höga fukthalter.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att fukthalten spelar en stor roll för vägens styvhet och att en väl fungerande dränering är viktigt. Ytterligare studier krävs dock för att utveckla sambanden mellan fukthalter och styvheter för mer generella resultat. Dessutom är de modeller som har presenterats i denna rapport ett första steg till att i framtiden göra det möjligt att förutspå styvhetsminskningar genom enkla mätningar och beräkningar. Väl fungerande modeller skulle då göra det mindre kostsamt och mindre tidskrävande att göra viktiga utredningar av vägkonstruktioners tillstånd.

Källförteckning

Agardh. S & Parhamifar. E, 2011 – ”*Kompendium i Vägbyggnad*”. KFS i lund AB, Lund.

Andersson. P, 2010 – ”*Tvådimensionell transport av salt, vatten och värme i vägkroppen*”. Trafikverket publikation 2010:100.

Andrei. D, 2003 – “Development of a Predictive Model for the Resilient Modulus of Unbound Material”. Doctor of Philosophy Dissertation, Arizona State University, 2003.

Burmister. D. M, 1945 – “*The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems*” *Journal of Applied Physics* 16, pp. 89 – 94.

Bäckman. L, 1986 – ”*Försök med plastfilterdränering vid väg 126, Torpsbruk, Kronobergs län. Förutsättningar och utförande*”. VTI meddelande 478, Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI), Linköping, Sweden.

Burström, P. G, 2007 - ”*Byggnadsmaterial, Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*”. Andra Upplagan. Studentlitteratur.

Campbell Scientific Inc, 2007 – “*Soil volumetric Water Content/Salinity Probes*”. Models EasyAG II and EnviroSMART, 2007. http://www.campbellsci.com/documents/product-brochures/b_easyag_envirosmart.pdf. [Besökt 20 juni 2012].

Cekerevac.C, Baltzer. S, Charlier. R, Chazallon.C, Erlingsson.S, Gajewska.B, Hornyh.P, Kraszewski C och Pavšič. P, 2009 – Water influence on mechanical behavior of pavements: Experimental investigation In: A. Dawson, 2009. “*Water in road structures*”. Springer

Charlier. R, Hornyh. P, Sršen. M, Hermansson. Å, Bjarnason. G, Erlingsson S och Pavšič. P, 2009. - Water influence on bearing capacity and pavement performance: Field observations. In: A. Dawson, 2009. “*Water in road structures*”. Springer

Das. B. M, 2010 - ”*Principles of geotechnical engineering*”, 7th edition, 2010.

Das, A och Goel, A. 2008 – “*Nondestructive Testing of Asphalt Pavements for Structural Condition evaluation: A state of the art*”. *Nondestructive Testing and Evaluation*. pp 121-140.

Doré. G & Zubeck. H.K, 2009 – “*Cold regions pavement engineering*”

Engineering & Research International. Inc, 2010 – “*KUAB Falling weight deflectometer*” Tillgänglig på: <http://www.erikuab.com/kuab.htm> [Besökt 2012-06-12]

Erlingsson. S, 2010a (September) – “*Falling weight deflectometer*”

Erlingsson. S, 2010b - “*Pavement Performance Models (NordFoU - PPM) Modelling of Rutting Performance – Comparison with LTPP Road*” Nordic Co-operation Programme, Report no. 2.4, 2010.

Erlingsson. S & Salour. F, 2011 - “*Influence of a Drainage System on Pavement Moisture status and its structural Behaviour - A case study on the Lv126 test road in Torpsbruk using FWD*” . Project Memorandum- Test Section on Lv126 Test road, Project status report. VTI.

Erlingsson. S, Brenčić. M och Dawson. A, 2009 - Water flow theory for saturated and unsaturated pavement material. In: A. Dawson, 2009. "*Water in road structures*". Springer.

Fetter. C. W, 2001 - "*Applied Hydrogeology*" 4th edition.

Foster, C. R & Ahlvin. R.G, 1954 - Stresses and deflections Induced by a Uniform Circular Load. Proceedings, Highway Research Board, Vol 33, pp 467-470. In: Huang, Y.H. "*Pavement Analysis and Design*". Second Edition, Pearson Education International. Prentice Hall, 2012.

Hansson. K, Hellman. F, Svensson. L-G och Enkell. K, 2012 – "*Utvärdering av djupdränering och effekt av tätad stödremsa och innerslänt utmed väg 126, Torpsbruk*" VTI notat 13-2012.

Huang, Y. H, 2012 – "*Pavement Analysis and Design*". Second Edition, Pearson Education International. Prentice Hall, 2012.

Irwin. L.H, 2006 – "*Backcalculation- An Overview and Perspective*". Cornell University, Itaca, NY, USA, 2006.

Isacson. U, 2000 – "*Drift och underhåll av vägar och gator*". Kungliga tekniska högskolan, Institutionen för infrastruktur och samhällsplanering. TRITA-IP AR 00-89. Stockholm 2000.

NCHRP, 2000 – "*Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*". Final Document, Appendix DD-1. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board and National Research Council, 2000.

Odemark. N, 1949 – "*Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin*". Statens väginstitut, meddelande 77. In: Ullidtz. P, 1998. *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*. Technical University of Denmark. Polyteknisk Förlag.

Papagiannakis, A. T och Masad, E. A, 2008 – "*Pavement Design and Materials*". New Jersey.

Rahman, S. & Erlingsson, S, 2012 - "*Moisture sensitivity of unbound granular materials*" Proceedings of the 4th European Pavement and Asset Management Conference, Malmö, Sweden, 5-7 September, CD-ROM.

Reynolds John M, 2011 – "*An introduction of Applied and Environmental Geophysics*". 2nd edition. John Wiley & Sons, Ltd, Publication.

Salour & Erlingsson, 2012 – "*Pavement Structural Behaviour during Spring Thaw- Interpretation of FWD measurements with monitoring environmental data from County road 126 at Torpsbruk*". VTI rapport 738A. Tillgänglig på: www.vti.se [Besökt: 2012-06-12]

Shahin M.Y, 1994 – "*Pavement management for airports, roads and parking lots*". 2nd edition. Springer. kap. 4 Nondestructive deflection testing.

Sveinsdóttir. B.Ö, 2011 – "*Pavement Behaviour Evaluation during Spring Thaw based on the Falling Weight Deflectometer Method*". KTH. Division of Highway and Railway Engineering, Department of Civil and Architectural Engineering

SKF, Svenska Kommunförbundet, 2003 – ”Bära eller brista”. Handbok i tillståndsbedömning av belagda gator och vägar – ny omarbetad upplaga.

Svenska Teknologföreningen, 1933 – ”Kompendium i Vägbeläggningsteknik”. Norrtelje Tidnings Boktryckeri- Aktiebolag, Norrtelje 1933.

Svensson. J, 1997 – ”Fuktmätning I väg – En kunskapsöversikt samt utveckling av en enkel fuktmätningssutrustning”. VTI. VTI meddelande 809

Timoshenko S. and Goodier N, 1951 – “*Theory of Elasticity. Engineering Societies Monographs*”. International Student Edition, Second Edition. McGraw-Hill Book Company.

Trafikverket, 1994 – ”ATB VÄG 94”. VV Publikation 1994:25. Kap 5.7 Obundna lager.

Trafikverket 2010a – ”ATB VÄG 2005”. Publikation 2005:112 - Kapitel C Dimensionering C3.4.3

Trafikverket 2010b - ”ATB VÄG 2005”. Publikation 2005:112 - Kapitel C Dimensionering C3.3.1

Trafikverket, 2011 – ”TRVK Väg – Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion”. Publikation 2011:072.

Trafikverket, 2012 – ”Trafikflödeskarta för Lv 126 norr om Torpsbruk”, (<http://gis.vv.se/tfk2/tfk/indextfk.aspx?config=tfk>) [Besökt: 2012-06-01]

Ullidtz. P, 1998 – “*Modelling Flexible Pavement Response and Performance*”. Technical University of Denmark. Polyteknisk Förlag.

Van Schelt W. et al., 1994 - Field and laboratory experiments with time domain reflectometer as a moisture monitoring system in road structures. In: Svensson. J, 1997. *Fuktmätning I väg – En kunskapsöversikt samt utveckling av en enkel fuktmätningssutrustning*. VTI. VTI meddelande 809.

Washington State Department of Transportation (WSDOT), 1995a – “*WSDOT Pavement Guide. Volume 2. Pavement Notes. For Design, Evaluation and Rehabilitation*”. Section 3.0 Pavement evaluation.

Washington State Department of Transportation (WSDOT), 1995b – “*WSDOT Pavement Guide. Volume 3. Pavement Analysis Computer Software and Case Studies. For Design, Evaluation and Rehabilitation*”. Section 2.0 EVERCALC – Pavement backcalculation.

Wiman Leif. G, 2001 – “*Accelerated load testing of pavements, HVS-NORDIC tests in Sweden 1999*”. VTI rapport 477A- 2001.

Yoder. E. J & Witczak. M. W, 1975 – “*Principles of Pavement Design*”. Second edition. John Wiley & Sons inc.

Bilaga – Uppmätta deflektioner och RMS

Uppmätta deflektioner för alla mätdatum. RMS-felet presenteras för att visa skillnaden mellan beräknade och uppmätta värden.

11 maj

| Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|-----------|-------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 50 | 405 | 404 | 333 | 332 | 263 | 262 | 182 | 182 | 131 | 131 | 72 | 72 | 45 | 45 |
| punkt 2 | 50 | 473 | 483 | 339 | 346 | 255 | 260 | 174 | 178 | 125 | 128 | 71 | 72 | 45 | 46 |
| punkt 3 | 50 | 393 | 402 | 296 | 303 | 224 | 229 | 144 | 147 | 98 | 100 | 54 | 55 | 36 | 37 |
| | | Medel Defl. | 430 | 327 | 251 | 169 | 119 | 67 | 43 | | | | | | |

RMS-fel 1.98

13 juni

| Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|-----------|-------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 50 | 509 | 510 | 408 | 409 | 320 | 321 | 220 | 220 | 158 | 158 | 88 | 88 | 56 | 56 |
| punkt 2 | 50 | 538 | 547 | 409 | 416 | 317 | 322 | 217 | 221 | 156 | 159 | 86 | 87 | 54 | 55 |
| punkt 3 | 50 | 469 | 483 | 361 | 371 | 290 | 298 | 199 | 205 | 140 | 144 | 79 | 81 | 50 | 51 |
| | | Medel Defl. | 513 | 399 | 314 | 215 | 154 | 86 | 54 | | | | | | |

RMS-fel 1.18

20 juni

| Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|-----------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 50 | 564 | 576 | 379 | 387 | 300 | 306 | 203 | 207 | 141 | 144 | 76 | 78 | 45 | 46 |
| punkt 2 | 50 | 595 | 607 | 454 | 463 | 365 | 372 | 251 | 256 | 177 | 181 | 96 | 98 | 62 | 63 |
| punkt 3 | 50 | 632 | 646 | 475 | 486 | 368 | 376 | 249 | 255 | 176 | 180 | 96 | 98 | 60 | 61 |
| punkt 4 | 50 | 524 | 535 | 408 | 416 | 318 | 324 | 211 | 215 | 151 | 154 | 83 | 85 | 52 | 53 |
| punkt 5 | 50 | 529 | 541 | 395 | 404 | 321 | 328 | 227 | 232 | 166 | 170 | 93 | 95 | 60 | 61 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| punkt 6 | 48.7 | 50 | 537 | 551 | 378 | 388 | 303 | 311 | 211 | 217 | 151 | 155 | 83 | 85 | 50 | 51 |
| punkt 7 | 49 | 50 | 456 | 465 | 321 | 328 | 253 | 258 | 176 | 180 | 127 | 130 | 69 | 70 | 44 | 45 |
| punkt 8 | 48.8 | 50 | 469 | 481 | 338 | 346 | 263 | 269 | 180 | 184 | 126 | 129 | 67 | 69 | 40 | 41 |
| | | | Medel. Defl. | 550 | | 402 | | 318 | | 218 | | 155 | | 85 | | 53 |

RMS-fel 1.56

4 juli

| | Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|------|-----------|--------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 48.8 | 50 | 530 | 543 | 395 | 405 | 315 | 323 | 218 | 223 | 153 | 157 | 82 | 84 | 49 | 50 |
| punkt 2 | 48.9 | 50 | 588 | 601 | 444 | 454 | 357 | 365 | 252 | 258 | 183 | 187 | 102 | 104 | 65 | 66 |
| punkt 3 | 48.8 | 50 | 607 | 622 | 458 | 469 | 356 | 365 | 246 | 252 | 176 | 180 | 97 | 99 | 60 | 61 |
| punkt 4 | 49 | 50 | 528 | 539 | 403 | 411 | 319 | 326 | 220 | 224 | 157 | 160 | 87 | 89 | 56 | 57 |
| punkt 5 | 48.8 | 50 | 511 | 524 | 395 | 405 | 323 | 331 | 234 | 240 | 173 | 177 | 96 | 98 | 62 | 64 |
| punkt 6 | 49.3 | 50 | 500 | 507 | 369 | 374 | 300 | 304 | 212 | 215 | 154 | 156 | 84 | 85 | 54 | 55 |
| punkt 7 | 49.1 | 50 | 494 | 503 | 319 | 325 | 257 | 262 | 183 | 186 | 133 | 135 | 72 | 73 | 45 | 46 |
| punkt 8 | 48.8 | 50 | 471 | 483 | 351 | 360 | 280 | 287 | 191 | 196 | 133 | 136 | 70 | 72 | 41 | 42 |
| | | | Medel. Defl. | 540 | | 400 | | 320 | | 224 | | 161 | | 88 | | 55 |

RMS-fel 1.35

1 augusti

| | Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|------|-----------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 48.4 | 50 | 634 | 655 | 368 | 380 | 285 | 294 | 192 | 198 | 136 | 140 | 72 | 74 | 43 | 44 |
| punkt 2 | 48.6 | 50 | 558 | 574 | 436 | 449 | 349 | 359 | 249 | 256 | 181 | 186 | 101 | 104 | 67 | 69 |
| punkt 3 | 48.7 | 50 | 593 | 609 | 447 | 459 | 352 | 361 | 241 | 247 | 173 | 178 | 95 | 98 | 59 | 61 |
| punkt 4 | 48.8 | 50 | 506 | 518 | 395 | 405 | 316 | 324 | 216 | 221 | 155 | 159 | 85 | 87 | 53 | 54 |
| punkt 5 | 48.8 | 50 | 516 | 529 | 402 | 412 | 326 | 334 | 232 | 238 | 169 | 173 | 94 | 96 | 59 | 60 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| punkt 6 | 48.5 | 50 | 534 | 551 | 383 | 395 | 309 | 319 | 218 | 225 | 156 | 161 | 84 | 87 | 49 | 51 |
| punkt 7 | 48.8 | 50 | 456 | 467 | 319 | 327 | 262 | 268 | 185 | 190 | 132 | 135 | 71 | 73 | 43 | 44 |
| punkt 8 | 48.7 | 50 | 461 | 473 | 342 | 351 | 273 | 280 | 187 | 192 | 132 | 136 | 69 | 71 | 40 | 41 |
| | | | Medel. Defl. | 547 | | 397 | | 317 | | 221 | | 158 | | 86 | | 53 |

RMS-fel 1.81

14-Sep

| | Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|------|-----------|--------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 49.7 | 50 | 539 | 542 | 408 | 410 | 332 | 334 | 238 | 239 | 172 | 173 | 89 | 90 | 48 | 48 |
| punkt 2 | 49.4 | 50 | 616 | 623 | 474 | 480 | 382 | 387 | 272 | 275 | 197 | 199 | 110 | 111 | 69 | 70 |
| punkt 3 | 49.2 | 50 | 607 | 617 | 465 | 473 | 368 | 374 | 257 | 261 | 185 | 188 | 104 | 106 | 63 | 64 |
| punkt 4 | 49.2 | 50 | 522 | 530 | 398 | 404 | 322 | 327 | 224 | 228 | 161 | 164 | 88 | 89 | 55 | 56 |
| punkt 5 | 48.8 | 50 | 469 | 481 | 372 | 381 | 318 | 326 | 242 | 248 | 186 | 191 | 106 | 109 | 67 | 69 |
| punkt 6 | 48.9 | 50 | 509 | 520 | 388 | 397 | 322 | 329 | 235 | 240 | 174 | 178 | 95 | 97 | 59 | 60 |
| punkt 7 | 49.1 | 50 | 464 | 473 | 337 | 343 | 273 | 278 | 197 | 201 | 144 | 147 | 77 | 78 | 49 | 50 |
| punkt 8 | 48.9 | 50 | 467 | 478 | 356 | 364 | 288 | 294 | 202 | 207 | 142 | 145 | 74 | 76 | 46 | 47 |
| | | | Medel. Defl. | 533 | | 407 | | 331 | | 237 | | 173 | | 94 | | 58 |

RMS-fel 1.37

16-Sep

| | Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|------|-----------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 49.4 | 50 | 440 | 445 | 324 | 328 | 259 | 262 | 180 | 182 | 124 | 126 | 61 | 62 | 34 | 34 |
| punkt 2 | 49.1 | 50 | 496 | 505 | 366 | 373 | 291 | 296 | 198 | 202 | 137 | 140 | 70 | 71 | 42 | 43 |
| punkt 3 | 49.1 | 50 | 467 | 476 | 348 | 354 | 267 | 272 | 174 | 177 | 116 | 118 | 60 | 61 | 38 | 39 |
| punkt 4 | 49.2 | 50 | 395 | 401 | 290 | 295 | 223 | 227 | 147 | 149 | 99 | 101 | 53 | 54 | 33 | 34 |
| punkt 5 | 49 | 50 | 377 | 385 | 292 | 298 | 241 | 246 | 172 | 176 | 125 | 128 | 67 | 68 | 41 | 42 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| punkt 6 | 48.8 | 50 | 426 | 436 | 311 | 319 | 250 | 256 | 172 | 176 | 118 | 121 | 60 | 61 | 36 | 37 |
| punkt 7 | 49 | 50 | 376 | 384 | 275 | 281 | 221 | 226 | 152 | 155 | 106 | 108 | 54 | 55 | 34 | 35 |
| punkt 8 | 48.9 | 50 | 404 | 413 | 294 | 301 | 229 | 234 | 153 | 156 | 104 | 106 | 53 | 54 | 31 | 32 |
| | | | Medel. Defl. | 431 | | 318 | | 252 | | 172 | | 118 | | 61 | | 37 |

RMS-fel 2.49

19-Sep

| | Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|------|-----------|--------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 49.5 | 50 | 421 | 425 | 305 | 308 | 240 | 242 | 164 | 166 | 115 | 116 | 58 | 59 | 34 | 34 |
| punkt 2 | 49.3 | 50 | 457 | 463 | 335 | 340 | 261 | 265 | 173 | 175 | 119 | 121 | 61 | 62 | 37 | 38 |
| punkt 3 | 49.3 | 50 | 448 | 454 | 330 | 335 | 249 | 253 | 161 | 163 | 109 | 111 | 57 | 58 | 36 | 37 |
| punkt 4 | 49.4 | 50 | 373 | 378 | 259 | 262 | 197 | 199 | 128 | 130 | 88 | 89 | 47 | 48 | 31 | 31 |
| punkt 5 | 49.3 | 50 | 347 | 352 | 260 | 264 | 212 | 215 | 150 | 152 | 108 | 110 | 58 | 59 | 37 | 38 |
| punkt 6 | 49 | 50 | 385 | 393 | 279 | 285 | 223 | 228 | 154 | 157 | 107 | 109 | 55 | 56 | 33 | 34 |
| punkt 7 | 49.5 | 50 | 335 | 338 | 240 | 242 | 192 | 194 | 131 | 132 | 92 | 93 | 49 | 49 | 30 | 30 |
| punkt 8 | 49.3 | 50 | 364 | 369 | 262 | 266 | 202 | 205 | 135 | 137 | 91 | 92 | 47 | 48 | 29 | 29 |
| | | | Medel. Defl. | 397 | | 288 | | 225 | | 152 | | 105 | | 55 | | 34 |

RMS-fel 2.11

22-Sep

| | Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|------|-----------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 49.3 | 50 | 397 | 403 | 283 | 287 | 218 | 221 | 146 | 148 | 98 | 99 | 47 | 48 | 27 | 27 |
| punkt 2 | 49.4 | 50 | 436 | 441 | 325 | 329 | 256 | 259 | 170 | 172 | 116 | 117 | 62 | 63 | 39 | 39 |
| punkt 3 | 49.1 | 50 | 463 | 471 | 336 | 342 | 259 | 264 | 169 | 172 | 113 | 115 | 56 | 57 | 35 | 36 |
| punkt 4 | 49.4 | 50 | 362 | 366 | 268 | 271 | 209 | 212 | 138 | 140 | 96 | 97 | 51 | 52 | 32 | 32 |
| punkt 5 | 48.9 | 50 | 334 | 342 | 252 | 258 | 208 | 213 | 151 | 154 | 111 | 113 | 60 | 61 | 37 | 38 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| punkt 6 | 49.2 | 50 | 410 | 417 | 295 | 300 | 231 | 235 | 158 | 161 | 112 | 114 | 57 | 58 | 34 | 35 |
| punkt 7 | 49.3 | 50 | 342 | 347 | 245 | 249 | 193 | 196 | 132 | 134 | 93 | 94 | 49 | 50 | 30 | 30 |
| punkt 8 | 49.4 | 50 | 356 | 360 | 253 | 256 | 198 | 200 | 132 | 134 | 91 | 92 | 46 | 47 | 29 | 29 |
| | | | Medel. Defl. | 393 | | 287 | | 225 | | 152 | | 105 | | 54 | | 33 |

RMS-fel 1.85

26-Sep

| Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|-----------|--------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 50 | 365 | 372 | 270 | 275 | 216 | 220 | 149 | 152 | 102 | 104 | 54 | 55 | 32 | 33 |
| punkt 2 | 50 | 437 | 444 | 322 | 327 | 253 | 257 | 170 | 173 | 119 | 121 | 63 | 64 | 42 | 43 |
| punkt 3 | 50 | 443 | 453 | 320 | 327 | 244 | 249 | 160 | 164 | 109 | 111 | 58 | 59 | 37 | 38 |
| punkt 4 | 50 | 362 | 368 | 265 | 269 | 205 | 208 | 136 | 138 | 93 | 95 | 49 | 50 | 31 | 32 |
| punkt 5 | 50 | 337 | 342 | 254 | 258 | 207 | 210 | 149 | 151 | 108 | 110 | 59 | 60 | 38 | 39 |
| punkt 6 | 50 | 372 | 379 | 274 | 279 | 219 | 223 | 152 | 155 | 107 | 109 | 56 | 57 | 34 | 35 |
| punkt 7 | 50 | 334 | 340 | 237 | 241 | 189 | 192 | 130 | 132 | 91 | 93 | 48 | 49 | 30 | 31 |
| punkt 8 | 50 | 354 | 360 | 261 | 265 | 203 | 206 | 135 | 137 | 92 | 93 | 47 | 48 | 30 | 30 |
| | | Medel. Defl. | 382 | | 280 | | 221 | | 150 | | 104 | | 55 | | 35 |

RMS-fel 2.24

13 oktober

| Load | Norm Load | D0 | Norm D0 | D1 | Norm D1 | D2 | Norm D2 | D3 | Norm D3 | D4 | Norm D4 | D5 | Norm D5 | D6 | Norm D6 |
|---------|-----------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|----|---------|----|---------|
| punkt 1 | 50 | 377 | 377 | 288 | 288 | 225 | 225 | 150 | 150 | 104 | 104 | 54 | 54 | 30 | 30 |
| punkt 2 | 50 | 402 | 403 | 300 | 301 | 241 | 241 | 170 | 170 | 121 | 121 | 66 | 66 | 41 | 41 |
| punkt 3 | 50 | 429 | 431 | 322 | 323 | 252 | 253 | 167 | 168 | 115 | 115 | 62 | 62 | 39 | 39 |
| punkt 4 | 50 | 361 | 363 | 271 | 273 | 212 | 213 | 140 | 141 | 97 | 98 | 52 | 52 | 32 | 32 |
| punkt 5 | 50 | 329 | 333 | 257 | 260 | 215 | 218 | 159 | 161 | 117 | 118 | 64 | 65 | 40 | 40 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| punkt 6 | 49.5 | 50 | 350 | 354 | 266 | 269 | 215 | 217 | 151 | 153 | 109 | 110 | 58 | 59 | 36 | 36 |
| punkt 7 | 49.4 | 50 | 322 | 326 | 236 | 239 | 192 | 194 | 132 | 134 | 92 | 93 | 49 | 50 | 30 | 30 |
| punkt 8 | 49.5 | 50 | 351 | 355 | 262 | 265 | 206 | 208 | 138 | 139 | 95 | 96 | 48 | 48 | 29 | 29 |
| | | | Medel. Defl. | 368 | | 277 | | 221 | | 152 | | 107 | | 57 | | 35 |

| | |
|---------|------|
| RMS-fel | 1.25 |
|---------|------|