

CHALMERS



Fukthaltens påverkan på bärigheten i en spårvägskonstruktion

En undersökning av sambandet mellan bärighet för ett krossat stenmaterial och dess fukthalt

Examensarbete inom högskoleprogrammet Byggingenjör

Karl Lampinen, Johan Malmheden

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, Sweden, 2014
Examensarbete 2014:109

FÖRORD

Vi vill tacka Göteborgs Spårvägar för allt stöd i arbetet. Vi vill rikta ett särskilt tack till Marika Cederblad, Peter Boberg, Roy Bessvi, Jan Olsson, Bo Petterson samt Peter Andersson.

Göteborg 2014-06-09

Karl Lampinen och Johan Malmheden

ABSTRACT

The purpose of our bachelor thesis was to investigate if there is a correlation between moisture in unbound materials and a lower bearing capacity of tramways in Gothenburg. Insufficient bearing capacity where traffic from both trams and buses occur, leads to asphalt damage and high maintenances costs. We have focused on the elasticity of an asphalt-macadam cross section and on moisture content in the unbound material of that cross-section, TK Klass II. Our hypothesis was that increased levels of moisture led to decreased bearing capacity.

Our method was to measure deflection with a static plate load test in situ and then the level of moisture by gravimetric analysis.

Due to a limited amount of measurement data, we couldn't reject our hypothesis. In addition to the lack of data, the method we choose made the effect of the subgrade on bearing capacity indistinguishable from the effect of the TK Klass II. Therefore we couldn't isolate the effect of moisture on the bearing capacity.

There are other methods, one which have been evolved by the Swedish transport administration, which by simpler means could show if the construction has enough bearing capacity for heavy traffic. If a tramway is unfit for heavy traffic, then the decreased bearing capacity due to moisture in the unbound material is secondary. Our conclusion is therefore that for the purpose of investigating if the tramway-structure has enough bearing capacity for heavy traffic, measuring of level of moisture is unnecessary.

Key words: tramway, tram, moisture, macadam, TK Klass II, static plate load test, bearing capacity, gravimetric method

SAMMANFATTNING

Syftet med vårt examensarbete var att undersöka om det fanns en korrelation mellan fukt i obundna bärmaterial och en lägre bärförmåga i Göteborgs spårvägsnät. Otillräcklig bärförmåga där både spårvagn och bussar samtrafikerar, leder till beläggningsskador och höga underhållskostnader. Rapporten är inriktad på elasticitet hos en asfalt-makadam normalsektion och på fukthalten hos det ingående materialet, TK Klass II. Vår hypotes var att högre fuktvärden leder till sämre bärighet.

Vår metod var att mäta försänkning via statisk plattbelastningsmetod in situ samt därefter fukthalten via gravimetrisk metod.

På grund av en begränsad mängd med mätdata, så kunde inte hypotesen förkastas. Utöver bristen på data innebar den valda metoden att undergrundens effekt på bärförmågan ej gick att särskilja från TK Klass II:s effekt på bärförmågan. Detta innebar att fuktens effekter på bärigheten inte kunde påvisas.

Det finns andra metoder, en som är utvecklad av Trafikverket, som med enklare procedur kan visa utifall en spårvägskonstruktion har tillräcklig bärförmåga för tung trafik. Om en spårväg är olämplig för tung trafik, då har den minskade bärförmågan på grund av fukthalten i det obundna bärmaterialet en sekundär betydelse. Vår slutsats blir därmed att om syftet är att undersöka bärförmågan för spårvägskonstruktionen som trafikeras av tung trafik, är fukthaltsmätning ej ett nödvändigt steg.

Nyckelord: spårväg, spårvagn, fukthalt, makadam, TK Klass II, statisk plattbelastning, bärförmåga, gravimetrisk metod

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord.....	1
Abstract.....	2
Sammanfattning.....	3
Innehållsförteckning.....	4
Beteckningslista.....	7
1. Introduktion.....	8
1.1. Bakgrund.....	8
1.2. Syfte.....	8
1.3. Avgränsningar.....	8
1.3.1 Endast en typ av normalsektion.....	8
1.3.2 Enbart In-situ mätningar.....	8
1.3.3 enbart mätningar i göteborg.....	9
1.3.4 Begränsat antal prover.....	9
1.3.4 enbart lastmodell.....	9
2. Historik.....	10
2.1. Vägens historia.....	10
2.2. Järnväg historik.....	10
2.3. Spårvägens historia.....	11
2.4. Göteborgs Spårvägar.....	11
3. Uppbyggnad.....	13
3.1. Spårvägens principiella uppbyggnad.....	13
3.1.1. Undergrund.....	13
3.1.2. Underbyggnad.....	14
3.1.3. Överbyggnad.....	14
3.2. Olika normalsektioner för spårväg.....	16
3.2.1. Spår på egen banvall.....	16

3.2.2. Avskilt spår	16
3.2.3. Gatuspår	17
3.3. Beståndsdelar	18
4. Teori	22
4.1. Kraftöverföring	22
4.1.1 Kraftöverföring i jordmaterial	22
4.1.2 Skjuvhållfasthet i friktionsjord	23
4.1.3 Parametrar som påverkar materialets hållfasthet	24
4.1.4 Spårvagnstrafik belastning	25
4.2. Fukt i överbyggnaden	27
4.2.1 Vattentransport i överbyggnaden	27
4.2.2 Konsekvenser av nuvarande förhållanden	28
4.3. Fuktens effekt på bärighet	28
4.3.1 Fuktens effekt på materialets skjuvhållfasthet	28
4.3.2 Finmaterials påverkan på skjuvhållfastheten	28
5. Teoretisk ansats	30
5.1. Hypotes	30
5.2. Teoretisk ansats	30
5.3. Behov av data	30
6. Metod och datainsamling	31
6.1. Metodbeskrivning för insamling	31
6.2. Genomgång av val av mätmetod för fuktmätning	31
6.2.1. Direkt metod för fuktmätning	31
6.2.2. Indirekta metoder för fuktmätning	32
6.2.3. Vald metod för fuktmätning	33
6.3. Metoder för bärighetsmätning	34
6.3.1. Statisk Plattbelastning	34
6.3.2 Fallviktmätning	36
6.3.3 Val av mätmetod för bärighet	37

6.4. Genomförande - datainsamling	38
7. Analys.....	40
7.1. statistisk prövning.....	40
7.2. Resultat.....	40
7.3. Begränsningar.....	40
7.3.1 Bristande mängd belastningsdata.....	40
7.3.2 Undergrundens effekter	40
7.3.3 Uttorkning av makadamproverna.....	41
8. Sammanfattning.....	42
8.1. Slutsats.....	42
8.2. Kommentar/diskussion.....	42
9. Källor	44
Muntliga referenser:	46
Bilaga I.....	47
Bilaga II.....	47

BETECKNINGSLISTA

AG 16: asfaltbundet grus; med stenfraktioner på 16 mm.

ABB 16: asfaltbetong, bindlager; med stenfraktioner på 16 mm.

ABT 11: asfaltsbetong, tät; med stenfraktioner på 11 mm

Bitumenfog: en fog som läggs mellan ex. asfalt och räls i gatuspår och som består av bitumen.

Kemankare: ett epoxymassa med hög draghållfasthet för bruk i bygg- och anläggning.

Polymerfog; en fog som läggs mellan ex. asfalt och räls i gatuspår och som består av polymerer.

Panderol: en form av fjäderbefästning av metall för befästning i främst slipers.

TK Klass I : bergkrossmaterial med huvudsakliga fraktioner mellan 32-64 mm.

TK Klass II: bergkrossmaterial med huvudsakliga fraktioner mellan 16-32 mm.

TOK-band: en form av bitumenfog.

1. INTRODUKTION

I detta kapitel behandlas arbetets bakgrund, syfte och avgränsningar.

1.1. BAKGRUND

Fukt i överbyggnaden antas orsaka skador i gatuspår. Det finns åtgärder för att minska fukten, men effekterna på överbyggnadens bärlighet är osäkra då det saknas en standardiserad metod för att mäta fukten i överbyggnadsmaterialet och jämföra med tillåtna gränsvärden där bärligheten påverkas menligt.

1.2. SYFTE

Examensarbetets syfte är att via in-situ mätningar testa hypotesen att fukt i makadam TK Klass II orsakar minskad bärlighet.

1.3. AVGRÄNSNINGAR

Här nedan listas för arbetet gjorda avgränsningar.

1.3.1 ENDAST EN TYP AV NORMALSEKTION

För att begränsa risken för felkällor är det fördelaktigt att jämföra spårtyper med likadana normalsektioner. Konsekvensen av detta är att arbetet enbart inriktas på en typ av normalsektion. Då beläggningsskador är den typen av skador som är mest kostsamt att åtgärda, så är gatuspår av typen asfalt-makadam mest intressant att studera.

1.3.2 ENBART IN-SITU MÄTNINGAR

Det har utförts laboratorieförsök på samband mellan bärlighet och fukthalt, via exempelvis triaxialförsök. För att kunna användas i den dagliga verksamheten behövs en metod som kan ge korrekta resultat via in-situ-mätningar.

1.3.3 ENBART MÄTNINGAR I GÖTEBORG

Spårväg finns i städer med klimatologiska förutsättningar liknande Göteborgs. Utöver detta skulle provtagningar i andra städer än i Göteborg, innebära kostnader som det ej fanns utrymme för i projektet.

1.3.4 BEGRÄNSAT ANTAL PROVER

Antalet prover begränsades till fyra med orsak av de givna ekonomiska förutsättningarna

1.3.4 ENBART LASTMODELL

Då det ej är tydligt om gatuspår i Göteborg dimensioneras med hänsyn till kombinationen av tung trafik och spårväg, används enbart trafikverkets lastmodell för spårväg. Trafiklasterna från busstrafik förmodas dock ha påverkan på överbyggnadsmaterialet där samtrafikering sker (Boberg, 2013).

2. HISTORIK

I detta kapitel behandlas vägens, järnvägens och spårvägens historik.

2.1. VÄGENS HISTORIA

De äldsta vägarna, i världshistorien såsom i Sveriges historia, var till en början så primitivt utformade att de närmast kunde liknas med djurstigar (Roads and highways 2013). Konsten att bygga vägar uppkom oberoende av varandra på flera platser runt om i världen. Det äldsta fyndet är en 6000 år gammal stenväg som grävdes fram vid Ur i nuvarande södra Irak.

De ökande kraven på vägarnas kvalitet sporrade flera ingenjörer inom området, där den mest framstående var John Loudon McAdam. McAdam använde sig flitigt av lösa material i vägbyggnaden, såsom grus och krossad sten – därav namnet makadam. Han lade även stor vikt i att anlägga vägen på en förhöjning för att på ett effektivt sätt lösa dräneringen. Den beskrivna vägkonstruktionsmetoden användes flitigt under 1800-talet, Tillsammans med investeringarna följde innovationer som att använda asfalt och betong som vägbyggnadsmaterial på en större skala, som i nutid är det primära material för väganläggning.

2.2. JÄRNVÄG HISTORIK

Tidpunkten för den första järnvägens uppkomst är svår att precisera, då man kan betrakta järnväg som bestående av tre olika komponenter: räls, lokomotiv och framförallt någonting att transportera. I antik tid, redan innan räls fanns, högs det upp spår på de vägar som brukades för att hindra att vagnshjulen gled av vägen. Det som kan betraktas som den första rälsen tros ha uppkommit i staden Assur, Assyriens huvudstad. Rälsen användes för transport, men inte för allmän trafik utan för att förflytta gudabilder (Rosander et al. 2005).

Järnväg som vi ser den idag, med järnhjul, järnräls och sliprar, fanns tidigt inom gruvdriften, likaså lokomotiv som uppfanns 1804. Det var dock inte

förrän 27 september 1825, på en sträcka mellan Stockton och Darlington i norra England, som de tre tidigare nämnda komponenterna - räls, lokomotiv förenades (Chandra, 2007).

2.3. SPÅRVÄGENS HISTORIA

Spårvägens ursprung härstammar, likt järnvägen, från hästdragna vagnar. Till skillnad från järnvägen skulle inte människor färdas mellan städer utan inom städer, där hästdragna vagnar redan var standard. Hästdragna vagnar som då drogs på spår, hade mindre friktion och kunde dra fler passagerare och därmed få ökad effektivitet. Den elektriska spårvagnen kan sägas ha uppfunnits av Frank J. Sprague som i Richmond i USA, 1888 konstruerade en vagn som hade en fjädrande bygel ansluten till en tråd ovanför vagnen och sedan till en elektrisk motor. Detta är principiellt samma sätt som spårvagnarna fungerar på idag (Transit gloria mundi, 2011).

Introducerandet av den elektrifierade spårvagnen blev början på spårvägens gyllene ålder. Då skedde en kraftig expansion av spårvägsnätet i olika städer runt om i världen. I och med bilens intåg, blev det större svårigheter att konkurrera med den bekvämlighet och flexibilitet som bilen innebar. Trots goda insatser i arbetet med att modernisera bland annat vagnarnas konstruktion så lyckades inte spårvagnen konkurrera och gick in i en period av stagnation. (Transit gloria mundi, 2011).

I nutid har spårvägen fått en renässans, både nationellt och internationellt. I Sverige finns långt gångna planer på att bygga spårväg i Lund och Malmö, samt expandera i Göteborg och Stockholm (Spårvagnsstäderna, 2013).

2.4. GÖTEBORGS SPÅRVÄGAR

Den första spårvägen i Göteborg konstruerades av det brittiska bolaget Construction Company Limited. Byggnationen påbörjades i juli 1879 och premiärturen från Brunnsparken till slutstationen vid Stigbergsliden skedde den 24 september samma år (Hammarsson, 1979).

År 1900 köptes spårvägen upp av Göteborgs Stad för att drivas i stadens regi. Senare förvärvades även busstrafiken av Göteborgs stad. (Göteborgs Spårvägar, 2013). Under åren har flera linjer tillkommit och ändrats i samband med att Göteborg genomgått stora förändringar. Exempelvis kan nämnas igenfyllningen av kanalerna som gav större möjligheter i centrala staden samt trångboddheten efter kriget som skapade behov av expansion och förbindelser till de nya förorterna: Kortedala, Angered och Västra Frölunda (Hammarsson, 1979).

Idag består spårvägsnätet av 12 linjer, 161 km spår och 108,5 miljoner resor gjordes med spårvägen under 2012 (Göteborgs Spårvägar, 2013).

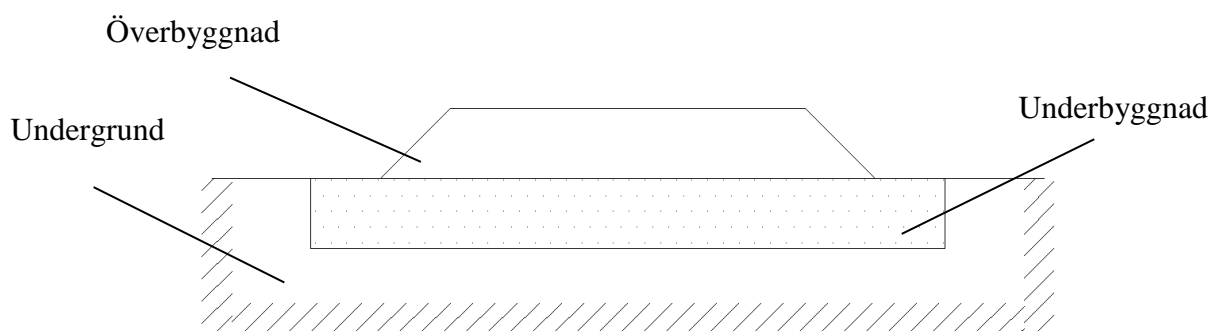
3. UPPBYGGNAD

I detta kapitel behandlar vi en spårvägskonstruktions principiella uppbyggnad, beskriver olika typer av normalsektioner för spårväg samt behandlar vissa av spårvägens beståndsdelar utförligare.

Strukturen på kapitlet är sådan att rapporten först visar hur en vanlig överbyggnad ser ut, för att senare fokusera på vad som särskiljer spårväg från väg och till sist fokusera på den normalsektionen vi valt att studera.

3.1. SPÅRVÄGENS PRINCIPIELLA UPPBYGGNAD

Spårvägen principiella uppbyggnad består av tre huvuddelar: överbyggnad, underbyggnad och undergrund.



Figur 1. Principskiss uppbyggnad.

3.1.1. UNDERGRUND

Undergrunden består oftast av samma material som den befintliga marken på konstruktionsplatsen. Undergrunden jämnas till för att fungera som fundament åt konstruktionens understa lager, det vill säga underbyggnaden. I Göteborg består undergrunden oftast av lera, med egenskap av att vara instabil och ge en viss vattengenomsläpplighet.

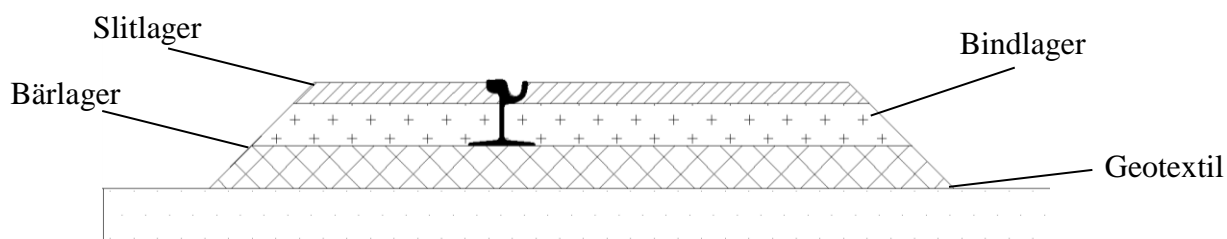
Undergrunden är den slutliga mottagaren av krafterna från trafiklasterna. Den behöver vara jämn för att ge ett bra underlag för underbyggnaden. Vidare behöver den dessutom vara fri från sättningar samt om möjligt inte kontaminera överliggande material (Granhage, 2009).

3.1.2. UNDERBYGGNAD

Spårvägens underbyggnad är den konstruerade terrass som bär upp överbyggnaden (Granhage, 2009). I Göteborgs spårvägsnät består store delar av underbyggnaden av så kallad skärvbotten. Skärvbotten är en genomsläpplig terrass av slagen natursten. Denna terrass antas vara dränerande, men erfarenheter antyder att så ej är fallet (Boberg, 2013).

3.1.3. ÖVERBYGGNAD

Olika typer av spårväg har olika normalsektioner, men det som beskrivs härnedan kan beskrivas som en generell överbyggnadskonstruktion. Viktiga ingående beståndsdelar beskrivs mer utförligt i kapitel 3.3.



Figur 2. Överbyggnad, med gaturäl i genomskärning.

3.1.3.1 GEOTEXTIL

Vid behov kan en geotextilduk mellan över- och underbyggnad användas. Geotextildukens funktion är att hindra blandning av grovkornigt material i överbyggnaden med de flergraderade material som underbyggnaden kan bestå av.

3.1.3.2 BÄRLAGER

Närmast ovanför underbyggnaden återfinns bärlagret vars funktion är att fördela och föra vidare till undergrunden de krafter som orsakas av trafiklast. Bärlagret kan klassificeras till två olika typer: ett bundet och ett obundet (Granhage, 2009).

Det obundna bärlagret består vanligtvis av krossat naturgrus eller krossat berg. Detta lager återfinns vanligtvis närmast undergrunden och är väldigt vanligt förekommande. I Göteborgs spårvägsnät består det obundna bärlagret vanligtvis av TK Klass I eller TK Klass II,

Det bundna bärlagret består av naturligt eller krossat material blandat med antingen asfalt eller betong. Förekomsten av bundna bärlager påträffas vanligtvis i hårt trafikerade vägar. I Göteborgs spårvägsnät används vanligtvis AG 16 som bundet bärlager.

I vissa fall kan det finnas ytterligare ett bärlager som består av ett material med sämre kvalitet än det obundna bärlagret. Detta bärlager kallas förstärkningslager och finns mellan det obundna bärlagret och underbyggnaden för att exempelvis öka tjäldjupet (Vägverket, 2005).

3.1.3.3 BINDLAGER

Närmast över bärlagret förekommer i många fall ett bindlager. Bindlagrets funktion är att agera som ett bindemedel mellan slit- och bärlager då kornstorleken i lagren skiljer sig åt. Bindlagret består av olika blandningar av asfalt eller betong beroende på komposition av slit- och bärlager. I Göteborgs spårvägsnät används ABB 16 som bindlager.

3.1.3.4 SLITLAGER

På ytan av överbyggnaden i vissa spårtyper (se kapitel 3.2.3) återfinns slitlagret, som vanligtvis är av asfalt. De primära funktionskraven för ett slitlager innefattar god friktionsförmåga, optiska egenskaper, jämnhet, hållfasthet samt nötnings- och deformationsresistens. Slitlagret behöver även ha en viss vattengenomsläpplighet för att förhindra att vatten ansamlas på

ytan då enbart avrinning inte räcker som avvattningslösning (Granhage, 2009).

I Göteborgs spårvägsnät används vanligen ABT 11 som slitlager, därefter betong och gatsten (Hedström, 2004).

3.2. OLIKA NORMALSEKTIONER FÖR SPÅRVÄG

Valet av lämplig normalsektion beror på ett flertal faktorer såsom trafiklast från spårvägstrafik och övrig trafik, krav på bullernivå som orsakas beläggingsmaterialet samt estetik. Spårvägens utföranden kan primärt in i spår på egen banvall, avskilt spår och gatuspår där olika normalsektioner används inom gruppen.

3.2.1. SPÅR PÅ EGEN BANVALL

Spår på egen banvall är identiskt med hur järnvägsräls är uppbyggt med undantaget att dimensioneringen utförts för spårvägstrafik. Vid denna typ av utförande används vanligtvis vignolräl, sliprar och ballast, men i undantagsfall kan gaturäl användas (Hedström, 2004). Annan trafik kan ej samtrafikera vid egen banvall vilket bidrar till att spårvägstrafiken tillåts färdas i högre hastigheter. Denna typ av spårvägsmiljö återfinns vanligtvis utanför Göteborgs mer tätbebyggda delar (Boberg, 2013).

3.2.2. AVSKILT SPÅR

Avskilt spår kan närmast beskrivas som en kombination av spår på egen banvall och gatuspår. Denna typ av spårvägsmiljö är primärt ämnad för spårvägstrafik men kan vid behov användas av exempelvis utryckningsfordon och fotgängare. Därmed kan ytskiktet på avskilt spår område variera beroende på andra faktorer än de som en vägs slitlager vanligtvis har, exempelvis friktion och optiska egenskaper.

Vanliga typer av slitlager som återfinns för avskilt spår innefattar exempelvis gräs, stensättning och grus. Då avskilt spår normalt sett ej trafikeras av icke-spårbunden trafik blir underhållsbehovet oftast lägre än med gatuspår (Hedström, 2004).

3.2.3. GATUSPÅR

Gatuspår är den typ av utförande som används då spårväg och annan icke spårbunden trafik behöver samtrafikera. Detta är vanligast förekommande i tätbebyggda områden, exempelvis stadskärnor. Ett gatuspår är oftast även mer komplicerat att projektera och bygga, då den i större utsträckning än andra utföranden behöver ta hänsyn till befintlig bebyggelse. Exempel på sådana hänsyn är att kurvradierna i gatuspår är betydligt mindre än för andra utföranden samt att större fokus behövs läggas på avvattning av hårdgjorda ytor (Hedström, 2004).

Samtrafikeringen av främst tung trafik likt busstrafik, leder till ett ökat slitage och underhållsbehov (Göteborgs Spårvägar, Årsredovisning, 2013).

De vanligast förekommande normalsektionerna för gatuspår i göteborg är asfalt-makadamspår samt betongspår.

3.2.3.1. ASFALT-MAKADAMSPÅR

Asfalt-makadamspår är en vanlig förekommande normalsektion och även huvudfokus för detta arbete.

Normalsektionen ser principiellt ut som den i kapitel 3.1.3 beskrivna överbyggnaden.

Till skillnad mot ett slipersspår där krafterna i horisontal- och vertikalled för ned i bärlagret av slipers, så förs de nedåtriktade krafterna av trafiklasterna direkt ned i bärlagret. De uppåtriktade krafterna samt horisontalkrafter hanteras av asfalten som ansluter till rälsen. Spårvidds måttet hålls via spårstag, traverser.

Asfalt-makadamspår har ett bundet bärlager, ett bindlager och ett slitlager som ligger från rälfot till räls överkant. Dessa lager fungerar som konstruktion för att bära trafiklasterna från den övriga vägtrafiken.

Rältypen i asfalt-makadamspår är nästintill uteslutande gaturäl.

I anslutningen mellan slitlager och räl kan, genom trafikbelastningar och temperaturförändringar, långsgående sprickor uppstå som kan underlätta vattengenomträngning till överbyggnaden. Olika metoder används för att motverka detta, däribland TOK-band, bitumenfog, polymerfog med mera (Olsson, 2013).

3.2.3.2. BETONGSPÅR

Betongspår består generellt av en bankkropp av betong. För att fästa rälsen i bankkroppen kan olika metoder användas, där två vanligt förekommande är via riffenplattor och in-fundo. Riffenplattor gjuts eller befästs in i betongplattan och därefter monteras rälsen fast på riffenplattor. Metoden med in-fundo innebär att skåror gjuts i betongen där rälsen läggs. Därefter gjuts en elastisk polymermassa som fäster mot betongytan och därmed fixerar rälsen i dess position. Val av överbyggnad varierar beroende på en rad olika förutsättningar såsom exempelvis ekonomi, estetik eller ljudkrav. En vanlig konstruktionsmetod är att använda ballast mellan bankkropp och överbyggnad, och det förekommer även varianter där betong används genom hela konstruktionen, exempelvis in-fundospår.

Underhållskostnaden för betongspår är lägre än makadam- och asfaltspår, men har betydligt högre anläggningskostnader.

3.3. BESTÅNDSDELAR

I detta kapitel behandlas några av spårvägsstrukturens beståndsdelar samt vilka egenskaper de behöver för god funktion.

3.3.1.1. RÄLS

Rälsens främsta och viktigaste funktion är styra tåget på ett mjukt och följsamt sätt. Andra funktioner är att uppnå minsta möjliga friktion mellan hjul och räls för en resurseffektiv transport.

Rälsen är även den konstruktionsdel som hanterar de olika trafiklasterna som uppkommer från spårvägstrafiken. Önskvärda egenskaper hos räls ur detta perspektiv är att den ska tåla slitage, vara skonsam mot vagnshjulen, höga

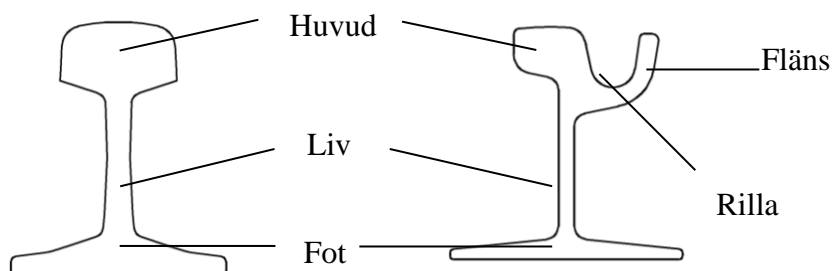
och låga temperaturer samt så kallade ”hammarslag”, en form av toppbelastningar.

Generellt sett är räls väldigt effektivt ur ett friktionshänseende, då friktionen mellan stålhjul och stålräls är ungefär en femtedel så stor som friktionen mellan ett däck och oljegrus. Samtidigt som friktionen ska vara låg mellan vagnshjul och räls ska även det finnas möjlighet till rullfriktion för exempelvis bromsverkan (Chandra, 2007).

Styrningen av tåget i kurvor sker genom hjulgeometrin i samverkan med rälsen. Kontaktytan mellan vagnshjulet och rälsen anses vara två cirklar som möts innesluten i en ellips. När vagnen rör sig utåt i en kurva, så kommer rälsens farkant att glida längre in mot hjulet. Det yttre hjulets omkrets är större på grund av fasningen, men det snurrar med samma hastighet som det inre hjulet. Denna skillnad i rotationssträcka innebär att hjulparet kommer vrida sig och medfölja att vagnen styrs i kurva.

Ur ett kraftfördelningsperspektiv kan rälsen betraktas, beroende på normalsektion, som antingen en kontinuerlig balk (slipersspår) eller en kontinuerlig balk med elastiskt stöd (asfalt-makadamspår). Krafterna förs antingen ned direkt i överbyggnaden eller via slipers, som behandlas i kapitel 3.3.2.2.

Här nedan visas ett exempel på vignolräl och gaturäl i sektion.



Figur 3. Vignolräl.

Figur 4. Gaturäl.

3.3.2.2. SLIPERS

Slipers är transversellt placerade objekt, oftast rätblock, som har funktion dels som lastfördelare och dels för befästning och positionering av rälsen. Vanliga konstruktionsmaterial för slipers är betong, trä och gjutjärn. I Sverige används däremot främst betong- och träslipers.

Via befästningar fästs rälsen i slipers, som då tillser att spårviddsmåttet, i Sverige 1435 mm, bibehålls. Ett avvikande spårviddsmått kan orsaka slitage, ojämn färd eller i värsta fall spårning, exempelvis vid solkurvor (Bosse, 2013).

Slipers bidrar också till att fördela krafterna på en större yta än om rälsen legat direkt på ballasten, samt hantera en del av de dynamiska lasterna. Inom spårväg är dock de dynamiska lasterna försumbara (Bårström, 2012).

Det finns en tydlig skillnad mellan hur trafiklasterna från spårväg på slipers och trafiklasterna från vägtrafik fördelas. Trafiklasterna från spårväg tas av rälsen som i sin tur vilar på slipers varifrån lastspridningen sker. Denna mer punktformade lastspridning kan jämföras med den jämnare lastspridningen orsakad av vägtrafik.

3.2.2.3. BEFÄSTNINGAR

En befästning är den del av konstruktionen som fixerar rälsen i den övriga överbyggnaden samt bidrar till att spårviddsmåttet hålls. Exempel på befästningar kan vara spikar, panderoller samt kemankare.

Allvarliga konsekvenser av ej korrekta befästningar kan dels vara att spåret hamnar ur position med urspårning som följd. En mindre allvarlig konsekvens kan vara att ej korrekt befästning gör att det kan uppkomma vibrationer som ger upphov till minskad komfort för resenärer.

Befästningar kan också finnas också mellan skenor i längsled. För att fästa olika längder av skenor med varandra. Denna metod kan användas istället för svets skarvar.

3.2.2.4. BALLAST

Ballast är oftast krossat stenmaterial men kan även bestå av sand, grus eller dylikt. Detta materiallager fungerar som underbyggnad för rälsen direkt eller indirekt via slipers. Ballast har även som funktion att hålla slipers, och därmed rälsen, i dess korrekta position.

I kraftöverföringshänseende överförs krafterna från trafiken via ballasten ner till undergrunden. Därmed ska ballasten ha en bra kraftspridande effekt. För att förhindra vattenansamlingar och fuktbindning, med minskad bärförmåga och tjälrisk som konsekvens, ska ballasten ha dränerande samt fuktbrytande egenskaper. För att inte krafterna ska bli för stora och krossa ballasten, och därmed öka risken för fuktansamling samt minska friktionen, så krävs ett minsta ballastdjup.

Då kraftöverföringsförmågan för ballasten beror på friktionen mellan ballastkornen (Dawson, 2008), så är positiva egenskaper hos en bra ballast bland annat slitstyrka samt god friktion. Detta behandlas närmare i kapitel 4.1.3.

Andra positiva egenskaper innefattar elasticitet för en god komfort samt att den är billig att producera.

4. TEORI

I detta kapitel behandlas teorin kring kraftöverföring i det studerade materialet.

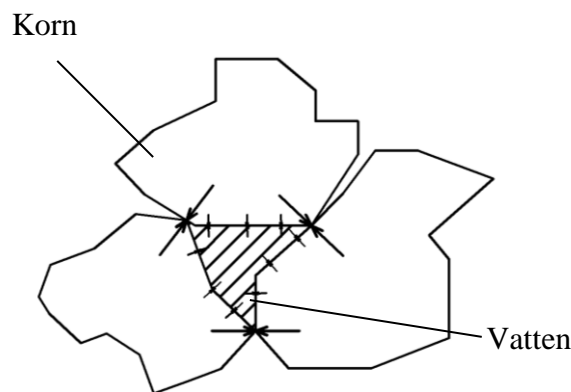
4.1. KRAFTÖVERFÖRING

Krafterna från belastning av spårväg och busstrafik måste ledas ned till undergrunden. Hur detta sker behandlas i detta kapitel.

4.1.1 KRAFTÖVERFÖRING I JORDMATERIAL

Jordmaterial kan betraktas som ett aggregat bestående av vatten eller vattenånga, luft samt mineralkorn. De individuella mineralkornen bildar i sin tur en mikrostruktur som kallas för kornskelett (Sällfors, 2009).

När ett jordmaterial belastas kommer en del av krafterna att överföras via kornskelettet och en del via det vatten som finns i porerna. Eftersom vatten har en mycket begränsad förmåga till kompression så kommer det befintliga vattnet i jordmaterialet att motverka belastningen på kornskelettet. Se nedanstående figur.



Figur 3. Skiss över kornskelett och förekomst av vatten.

De resulterande krafterna på kornskelettet benämns som effektivspänning och definieras som krafterna fördelade på mineralkornens area med det

mothållande vattentrycket avdraget. Formeln (1) som beskriver beräkningen av effektivspänningen ser ut som följer:

$$\sigma' = \sigma + u \quad (1)$$

- σ = spänningen på kornskelettet
- σ' = effektivspänningen
- u = vattentrycket, oftast mothållande

I de fall där det inte finns något mothållande vattentryck, exempelvis gällande fullständigt dränerande material, så sätts u till 0. Med, u , i ovanstående formel angivet som 0 blir effektivspänningen lika med normalspänningen, d.v.s $\sigma' = \sigma$.

4.1.2 SKJUVHÅLLFASTHET I FRIKTIONSJORD

Det material som studeras definieras som ett friktionsmaterial. Detta friktionsmaterials hållfasthet beror på den friktion som uppkommer mellan mineralkornen i kornskelettet. Hög friktion innebär att materialet kan ta stora krafter innan brott uppkommer medan låg friktion mellan kornen innebär motsatsen (Granhage, 2009). Friktion beräknas enligt formel (2) nedan.

$$F = \mu(N)N \quad (2)$$

- $\mu(N)$ = friktionskoefficient som en funktion av normalkraften
- N = normalkraften
- F = den yttre friktionskraften

Som kan utläsas ur ovanstående formel (2), så innebär en minskad kraft på mineralkornen en lägre friktionskraft och därmed lägre hållfasthet. Även en minskad friktionskoefficient minskar friktionskraften. När den ur formel (1)

beräknade effektivspänningen överstiger materialets skjuvhållfasthet så uppstår ett skjuvbrott.

4.1.3 PARAMETRAR SOM PÅVERKAR MATERIALETS HÅLLFASTHET

Det material som studeras används som överbyggnadsmaterial. Här nedan behandlas de olika parametrar och egenskaper som påverkar materialets hållfasthet. De parametrar och egenskaper där vatten ej har påverkan på hållfastheten behandlas summariskt.

4.1.3.1 FORMEN

Två egenskaper som påverkar hållfastheten är storlek och form. Större stenstorlek innebär högre hållfasthet. Den optimala formen är kubisk, vilket ger att egenskaper såsom flisighet och stänglighet innebär försämrade hållfasthetsegenskaper.

När det gäller ytformen, så har ojämnheter positiv inverkan på hållfastheten. Ojämnheter ökar friktionskoefficienten, vilket enligt formeln i 4.1.2 ökar friktionen mellan kornen. Därför är en viktig egenskap krossytegrad, som tar hänsyn till mängden krossade ytor.

Även ett välgraderat material, vilket definieras som ett material med många olika stenstorlekar, har positiv inverkan på hållfastheten. Det aktuella materialet är fågraderat vilket innebär att dess egenskaper ej är relevant för examensarbetet (Granhage, 2009).

4.1.3.2 FÖRMÅGA ATT MOTSTÅ NÖTNING

För att materialet ska behålla sina skarpa kanter och därmed en hög friktionskoefficient, är förmågan att motstå nötning en viktig egenskap. Förmågan att motstå nötning klassificeras genom Micro deVal- eller Los Angeles-värde. Mängden glimmer, som är en mjukare form av bergart, påverkar förmågan att motstå nötning negativt (Granhage, 2009).

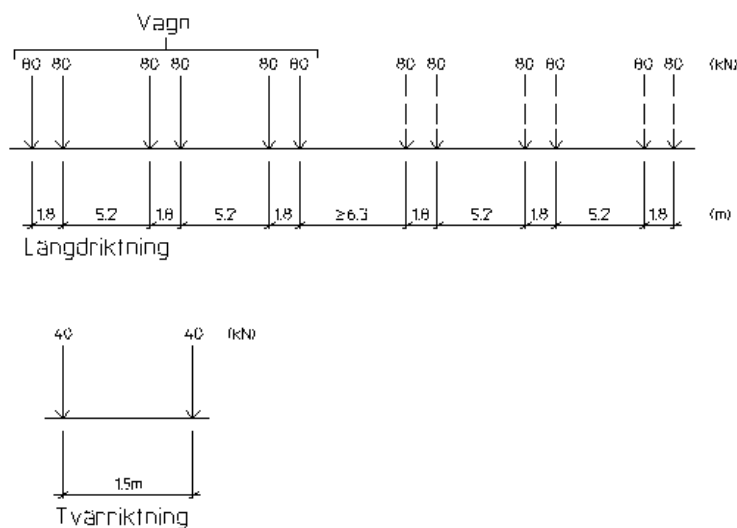
4.1.3.3 FINMATERIAL

Finmaterial defineras som material vars kornstorlek understiger 0,063 mm(E933-1). Mängden finmaterial påverkar hållfastheten negativt med ökad mängd. Finmaterialets påverkan på hållfastheten behandlas närmare i kapitel 4.3.2. De kvalitetskrav som ställs av Trafikkontoret i Göteborg gällande halten av finpartiklar, minskar risken för initiala höga halter av finmaterial (Teknisk Handbok, 2013).

Det finns dock andra faktorer som påverkar halten av finmaterial, bland annat belastning och krossning av materialet, ej tillräckligt tät ytbeläggning, inträngning av vatten underifrån samt från sidan av överbyggnadskonstruktionen. Dessa faktorer ger att ett material kan uppnå en hög halt av finpartiklar, trots att den initiala halten var låg.

4.1.4 SPÅRVAGNSTRAFIK BELASTNING

Rälsen kan betraktas som en kontinuerlig balk med kontinuerligt stöd. Axellasterna från spårvagnstrafiken kan betraktas som dynamiska laster, med lastmodeller likt SPV 1 eller SPV 2. Se figur 6.



Figur 6. Kraftpåverkan på räls illustrerat som på kontinuerlig balk (Teknisk Handbok, 2013).

I detta arbete är dock dessa lasters typ enbart av sekundärt intresse, så lasterna betraktas som statiska laster. Lasterna förs via rälsen ned till makadamen i överbyggnaden.

För att kunna sprida krafter så behövs ett tillräckligt tjockt lager av makadam. Lagret ska, enligt normalsektionen för gatuspår i Göteborgs Stad, uppgå till 200 mm. För tunna lager av makadam ökar risken för krossning av materialet och därmed en ökad grad finmaterial.

4.2. FUKT I ÖVERBYGGNADEN

Här nedan behandlas fukt i överbyggnaden samt åtgärder för att minska mängden fukt i överbyggnaden. Åtgärder för avledning samt dränering behandlas summariskt.

4.2.1 VATTENTRANSPORT I ÖVERBYGGNADEN

I detta arbete benämns alla former av vatten i konstruktionen som fukt. Fukt transporteras in i överbyggnaden på främst följande tre sätt: som inträngande vatten genom beläggningen, som inträngande vatten från sidan och som uppträngande vatten genom undergrunden.

Beläggningsskador och bristande avrinning ökar inträngningen av vatten uppifrån. I gatuspår är dessutom anslutningen mellan ytbeläggningen och rälsen en möjlighet för inträngning av vatten i överbyggnaden. En ej funktionell anslutning mellan räls och asfalt har samma effekt som långsgående sprickor genom ytbeläggningen.

En hög grundvattenyta samt bristande dränering ökar risken för inträngning av vatten underifrån och från sidorna.

Åtgärder för att minska mängden vatten i överbyggnaden kan delas upp i två delar: avvattning och dränering.

4.2.1.1 AVVATTNING

Avvattning i gatunätet sker via olika typer av rännstensbrunnar eller dagvattenbrunnar samt genom avvattning via rillan i rälsen. Det ytvatten som inte leds bort via rännstensbrunnar rinner ner i rillan. Där finns det håltagning i botten av rillan som är kopplade till avlopp via olika typer av brunnar, exempelvis Klückner-brunnar.

Avvattningen i Göteborgs spårvägsnät kan i många delar anses vara otillräcklig. Den otillräckliga avvattningen i kombination med beläggningsskador och ej funktionell anslutning mot räls innebär att stora mängder vatten tränger in i överbyggnaden.

4.2.1.2 DRÄNERING

Dräneringens uformning är beroende av respektive normalsektion. Stora delar av Göteborgs spårvägsnät kan anses sakna dränering eller ha en underdimensionerad dränering. Utöver dränering antas undergrunden vara helt genomsläpplig och därmed ha en dränerande funktion. Antagandet går ej att styrka och empiri tyder på att undergrunden är i stora delar är helt tät.

4.2.2 KONSEKVENSER AV NUVARANDE FÖRHÅLLANDEN

Nuvarande förhållanden resulterar i att det vatten som tränger in i överbyggnaden riskerar att ej dräneras bort. Detta innebär en ökad fukthalt i överbyggnaden som kan orsaka exempelvis tjälsprängningar och minskad bärighet, vilket behandlas i kapitel 4.3.

4.3. FUKTENS EFFEKT PÅ BÄRIGHET

I detta kapitel behandlas hur och vilken effekt som fukt har på bärigheten.

4.3.1 FUKTENS EFFEKT PÅ MATERIALETS SKJUVHÅLLFASTHET

Det överbyggnadsmaterial som studeras, makadam TK Klass 2, har såpass grova fraktioner (16mm – 32 mm) (Teknisk Handbok, 2013), att materialet kan anses vara fullständigt dränerande (Granhage, 2009). Den fullständiga dräneringen ger att det därmed ej uppkommer något mothållande vattentryck vilket i sin tur ger att $\sigma' = \sigma$.

4.3.2 FINMATERIALS PÅVERKAN PÅ SKJUVHÅLLFASTHETEN

Finmaterialet som förekommer i det studerade materialet binder lätt fukt. Fukt i kombination med finmaterialet bildar ett aggregat som agerar friktionhämmande. Således jämnar finmaterialet ut ojämnheter i ballastkornen samt bildar ett avstånd mellan kornen i kornskelettet. Resultatet blir att friktionen minskar och därmed påverkar hållfastheten negativt.

En ökad mängd finmaterial, i kombination med fukt innebär därmed en påtagligt minskad hållfasthet. Störst påverkan på hållfastheten sker inte när

finmaterialet är blötlagt eller torrt utan då det blötläggs och därefter får torka ut.

5. TEORETISK ANSATS

I detta kapitel behandlas den teoretiska grunden för hypotesen.

5.1. HYPOTES

Hypotesen är att det kommer kunna påvisas ett negativt samband mellan ökad andel fukt i TK Klass II och materialets bärighet.

5.2. TEORETISK ANSATS

Som tidigare beskrivits i kapitel 4.2.1.2, så kan materialet antas vara dränerande. Stora delar av språvägsnätet saknar även täta ytskikt eller täta anslutningar mellan räl och asfalt. Utöver detta kan dräneringen på flera ställen anses vara undermålig, vilket gör att materialet förväntas blötläggas och torkas ut regelbundet vid nederbörd. Detta innebär att störst negativ påverkan på hållfastheten som tidigare beskrivs i 4.3.2.

Vi antar att materialet efter nederbörd och av inträngande vatten ej torkar ut fullständigt på grund av bristande dränering. Dessa förhållanden resulterar i att mängden finmaterial har direkt påverkan på hållfastheten. Mängden finmaterial kan mätas genom mängden fukt i materialet, då makadamen rent teoretiskt är helt dränerande. Hög mängd fukt innebär då hög mängd finmaterial vilket innebär försämrade hållfasthet. Hållfastheten kan beräknas genom att anta ett samband mellan elasticiteten och bärigheten. Elasticiteten kan mätas genom mätningar in-situ. Därmed kan ett samband undersökas mellan fukt och hållfasthet.

5.3. BEHOV AV DATA

Det behov av data som föreligger för att pröva hypotesen är fuktkvoten samt elasticitetsmodulen för det undersökta materialet.

6. METOD OCH DATAINSAMLING

I detta kapitel behandlas olika metoder för att pröva hypotesen och beskrivning av den valda metoden.

6.1. METODBESKRIVNING FÖR INSAMLING

De metoder som användes för att testa hypotesen var elasticitetsmätning samt fukthaltsmätning av makadamen. Prover till fuktmätning togs från de platser där elasticitetsmätningen utfördes.

6.2. GENOMGÅNG AV VAL AV MÄTMETOD FÖR FUKTMÄTNING

Här nedan presenteras några utvalda metoder för fuktmätning och motiveringen till den för provtagningen valda metoden. Mätmetoderna kan delas upp i direkta och indirekta.

6.2.1. DIREKT METOD FÖR FUKTMÄTNING

Denna metod uppmäter fukthalten direkt och har således en låg felfrekvens. Metodens största nackdel är att den har störande påverkan på mätplatsen.

6.2.1.1. GRAVIMETRISK METOD

Den gravimetriska metoden vid fuktmätning i vägkroppen innebär att ett materialprov, exempelvis makadam, insamlas och omsluts noga i en tät behållare. Därefter vägs materialprovet i ett laboratorium för att sedan torkas i 105°C. Torkningen pågår tills allt vatten förångats och ventilerats bort. Mängden av det vatten som materialprovet ursprungligen innehöll kan således beräknas genom att subtrahera materialets torkade vikt med dess ursprungliga vikt.

Denna metod anses ge de mest precisa mätresultaten (Svensson, 1997), men har som största nackdel att prover måste tas från mätplatsen. Detta innebär att störande utgrävningar måste göras. Metoden lämpar sig därmed vid tillfällen

då provtagning inte påverkar funktionen negativt eller kan återställas i efterhand.

6.2.2. INDIREKTA METODER FÖR FUKTMÄTNING

Indirekt mätning kan enklast beskrivas som mätning av fysikaliska egenskaper som indikerar fuktmängd (Dawson, 2008). För indirekta mätmetoder krävs fler steg i processen än vid direkta metoder vilket leder till att felfrekvensen ökar. De främsta fördelarna med indirekt mätning är mobiliteten då mätningar in-situ kan utföras samt att indirekta mätningar kan göras utan att störa de undersökta platserna.

6.2.2.1. TDR, TIME DOMAIN REFLECTOMETRY

TDR-metoden baseras på att en elektromagnetisk puls skickas ut via en nedgrävd prob som sedan reflekteras tillbaka och registreras i ett oscilloskåp. Med oscilloskåpet kan permitiviteten i jordmaterialet, K , utläsas. I jordmaterial har vatten hög permittivitet och torr jord har låg permittivitet. Permittivitetsskillnaden gör att fukthalten i jordmaterialet går att mäta (Svensson, 1997, s. 28).

6.2.2.2. KAPACITANSMÄTARE

Likt TDR baseras även denna metod på mätning av jordmaterialets permittivitet. Däremot skiljer sig sättet att mäta permitiviteten genom att istället använda två elektroder separerade av ett dielektrikum, ett material med lite eller ingen ledningförmåga. I detta fall ingår jordmaterialet i mätkretsen som ett dielektrikum (Svensson, 1997, s. 29). Jordmaterialets varierande fukthalt kommer således ge olika utslag i den oscillator som används för att registrera frekvensändringar.

6.2.2.3. ISOTOPMÄTARE

Denna metod baseras på mätningar av två olika typer av strålning: gamma- och neutronstrålning. Gammastrålningen används till att bestämma jordmaterialets densitet och neutronstrålningen för att bestämma jordmaterialets vattenmängd.

När neutronerna i strålningen passerar en väteatom minskar neutronernas hastighet. Då väteatomer är en beståndsdel i vattenmolekyler indikerar den uppmätta hastighetsminskningen jordmaterialets vattenmängd.

Fördelen, och samtidigt nackdelen med denna metod, är att noggrannheten är väldigt hög, ned till enskilda väteatomer (Svensson, 1997, s. 30). Vilket ger precisa resultat gällande vattenmängden, men där resultatet försämras av att organiska material som även de innehåller väte inkluderas. Detta måste vägas in vid kalibrering av mätutrustning beroende på vilken typ av jord som undersöks.

6.2.2.4. GEORADAR, GPR/GROUND PENETRATING RADAR

GPR-metoden baseras på användandet av elektromagnetiska energipulser som skickas ned i marken (Svensson, 1997, s. 32). Pulserna reflekteras på olika sätt i jordmaterialet beroende på materialets egenskaper och på så vis kan vatteninnehållet bestämmas. Tekniken baseras, likt TDR-metoden, på jordens permittivitet.

6.2.2.5. RESISTANMÄTNING

Resistansmätningssmetoden baseras på mätningen av resistans i ett tillsatt poröst material (Svensson, 1997, s. 32). Det porösa materialet antar efter en tid samma fukthalt som det omgivande jordmaterialet. Därefter mäts resistansen i det porösa materialet, och beroende på materialets fukthalt så varierar denna.

Nackdelen med metoden är att det porösa materialet ofta bryts ned vilket påverkar noggrannhet vid mätning. Resistansen i det porösa materialet påverkas även av dess salthalt. Detta innebär sämre noggrannhet vid mätning nära vägmiljöer som saltats.

6.2.3. VALD METOD FÖR FUKTMÄTNING

Gravimetrisk metod ger det mest noggranna resultatet och är dessutom enkelt att utföra då behov av avancerad utrustning ej föreligger. Då platsen för provtagning var på avstängt spår kunde gravimetrisk metod med fördel

användas. De schakter som behövdes för att anskaffa proverna kunde enkelt återfyllas med nytt material.

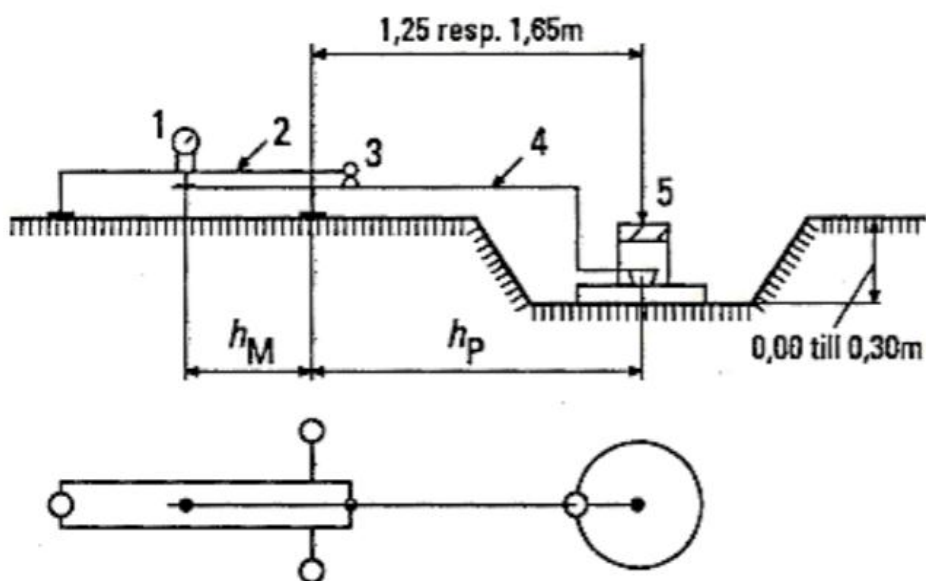
6.3. METODER FÖR BÄRIGHETSMÄTNING

Här nedan presenteras några utvalda metoder för mätning av bärighet och motiveringen till den för provtagningen valda metoden.

6.3.1. STATISK PLATTBELASTNING

Denna metod baseras på att ett provunderlag stegvis belastas i två omgångar med hjälp av hydraulisk tryckutrustning. Dessa två omgångar ger deformationsmodulerna E_{v1} och E_{v2} . Belastningarna orsakar både elastiska och plastiska deformationer i provunderlaget. Elastisk deformation orsakar sättningar som återgår efter att belastning avlägsnats medan plastiska deformationer består. Detta innebär att provgrundens elastiska och plastiska deformationsegenskaper kan fastställas (Vägverket, 1993).

Deformation som uppstår vid belastningsplattans centrum registreras med hjälp av det mätur som återfinns på mätinstrumentet. För att erhålla rätt sättningsvärde s , vid belastningsplattan, krävs att den observerade sättningen på mäturet, s_M multipliceras med ett översättningsförhållande h_p/h_M (se fig 7).



Figur 7. Efter principen med vågbalkens vridbara avkänningsarm. Sättningsmätning med hänsyn tagen till hävstångsförhållandet h_p/h_M (Vägverket, 1993).

1. Mätur eller lägesgivare
2. Monteringsrigg
3. Vridpunkt
4. Avkänningsarm
5. Last

Som nämnts tidigare belastas provgrunden stegvis med en kraft, vilket bör vara i följande sekvens: 0,08 - 0,16 - 0,24 - 0,32 - 0,40 - 0,45 och 0,50 Mpa (Vägverket, 1993). Första pålastningen bör ske under två minuter, och efterföljande i minst 1 minut. Provgunden måste avlastas fullständigt efter att varje pålastning utförts, samt vänta i 2 minuter innan nästa steg påbörjas. Beroende på hur stor belastningsplatta som används kan medelnormalspänningen σ_0 bestämmas genom sambandet spänning per ytenhet.

För att få fram deformationsmodulen, E_v , krävs att beräkningar utförs. Konstanterna S och σ_0 , som är kända från mätningen, kan användas för att

lösa ut konstanterna \mathbf{a}_0 , \mathbf{a}_1 och \mathbf{a}_2 ur formel (3). Denna beräkning utförs med fördel med hjälp av en datorhjälpmedel (Vägverket, 1993).

$$\mathbf{s} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot \sigma_0 + \mathbf{a}_2 \cdot \sigma_0^2 \quad (3)$$

- \mathbf{s} = sättning i belastningsplattans centrum i mm
 σ_0 = medelnormalspänningen i under plattan i MN/m²
 $\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ = konstanter i andragradspolynomet

När konstanterna i andragradspolynomet är kända kan deformationsmodulen E_v beräknas fram direkt genom formel (4).

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot 1/(\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 \sigma_{1\max}) \quad (4)$$

- r = belastningsplattans radie i mm
 $\sigma_{1\max}$ = maximal medelnormalspänning vid den första belastningen i MN/m²

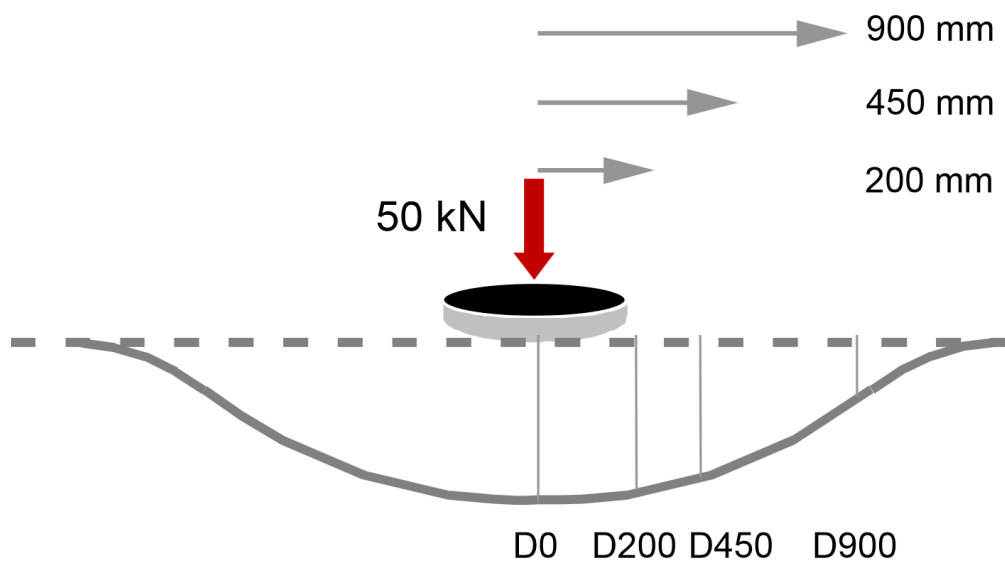
Vidare kan bärighetskvoten räknas fram genom det enkla sambandet i formel (5).

$$E_{v2}/E_{v1} \quad (5)$$

- E_{v1} = deformationsmodulen från första belastningen
 E_{v2} = deformationsmodulen från andra belastningen

6.3.2 FALLVIKTMÄTNING

Mätmetoden används för att fastställa styvhetsegenskaper för vägunderlag. Provtagningen sker genom att belasta provunderlaget med en kraftpuls motsvarande ett lastbilshjul. Kraftpulsens åstadkoms genom att låta en vikt falla på ett fjädersystem som för ner kraften i en cirkulär belastningsplatta med en diameter på 30 cm. Storleken på kraftpulsens är vanligtvis 50 kN, men kan variera beroende på det undersökta underlagets tjocklek. Pålastningstiden för kraftpulsens bör enligt Vägverkets metodbeskrivning ej understiga 10 ms (Trafikverket, 2012). Vidare är mätningarna beroende av att korrekta temperaturer i luft och mark noteras vid mätningstillfälle.



Figur 8. Beskrivning av fallviktsmätning och givaravstånd (Trafikverket, 2011).

Momentana deformationer, även kallat deflektioner, uppstår på grund av belastningsstöten. Deflektioner registreras med hjälp av minst 7 givare, placerade i och på bestämda avstånd från belastningscentrum. Desto längre ut från belastningscentrum som deformationer registreras desto djupare är de lager som orsakar deflektionen. Om tjockleken på lagren i provunderlaget är kända kan styvhetsgenskaper för de enskilda lagren räknas ut. Då styvhetsgenskaperna fastställts kan även provunderlagets bärighet bestämmas (Trafikverket, 2012).

Fallviktsmätning utförs vanligtvis vid kontroll av vägar där lagertjocklekar är kända sedan innan. Själva fallviktsapparaten kan till utseendet närmast beskrivas som ett bilsläp och är således enkelt att transporteras och användas.

6.3.3 VAL AV MÄTMETOD FÖR BÄRIGHET

Vi har i vårt arbete valt att använda statisk plattbelastning som mätmetod. Grunden till beslutet låg i ett antal punkter som talade för och emot de olika mätmetoderna.

Det främsta argumentet som talade emot mätning med fallviktsapparat grundas på att tjockleker i underlaget vid planerade provtagningsplatser ej med säkerhet kunde fastställas. Detta medför att fallviktsapparatens förmåga att analysera i vilka lager deflektion uppstår från ej skulle utnyttjas. Vidare förelåg även en risk att andra komponenter från spårvägen såsom spårstag kunde störa mätningar. Ett blottlagt provområde kunde däremot lättare inspekteras och fastställas vara opåverkat, vilket talar för statisk plattbelastning som mätmetod.

Valet av statisk plattbelastning som mätmetod ansågs också vara särskilt lämplig då fuktigheten i det undersökta materialet även skulle mätas. Blottläggning av provtagningsplatsen innebar tillgång till att hämta prover för fuktmätning.

6.4. GENOMFÖRANDE - DATAINSAMLING

Den 18 september 2013 utfördes mätningarna på Berzeliigatan i Göteborg. Göteborgs spårvägar tillhandahöll personal för provtagningen och Amir Rajabi från Svevia utförde plattbelastningsprovtagningen.

Platsen där mätningarna utfördes valdes enligt vissa kriterier. Det främsta kriteriet var att normalsektionen var likadan längs hela sträckan. Det andra kriteriet var att det inte fanns någon fall åt något håll, så vattenflödena förväntades inte skapa olika förhållanden längs sträckan som proverna togs ifrån. Detta gjorde att risken för dessa felkällor minskades. Det slutgiltiga kriteriet var att provet togs längs en sträcka med känd beläggningsproblematik.

Kraftig nederbörd pågick under flera timmar innan provtagningen, men med uppehåll under provtagningen. Detta innebar att förhållandena kan likställas med ett genomblött och delvist upptorkat jordmaterial enligt kapitel 4.3.2.

På fyra punkter längs en sträcka med känd beläggningsproblematik sågades kvadrater i asfalten med en asfaltskap. Placeringen av kvadraterna var mellan

de två rälerna i sidled samt mellan spårhållare i längsled. Storleken på kvadraterna var cirka 1 kvadratmeter.

Asfaltsbeläggningen avlägsnades därefter för att inte varierande elasticitet i beläggningen skulle påverka plattbelastningsprovtagningen.

När makadamen var frilagd utfördes plattbelastningsprovtagningen enligt kapitel 6.3.1.

Efter att plattbelastningsprovtagning utförts togs makadamprover. Proverna togs ca 30 cm under den frilagda makadamens yta. Detta gjordes för att få mer korrekta fuktvärden, då det förlåg en risk att makadamen i den frilagda ytan hade hunnit torka under tiden den låg frilagd. Tagna makadamprov lades i en plastpåse där luften i största mån pressades ur innan påsen förslöts med en knut. Den gravimetriska provtagningen utfördes cirka 2 timmar efter att det första makadamprovet tagits. Torkningen utfördes enligt föreskriven metod i kapitel 6.2.1.1 under en tid på 24 timmar.

7. ANALYS

I detta kapitel utförs analysen av det insamlade materialet.

7.1. STATISTISK PRÖVNING

Students t-fördelning antas vara den lämpligaste metoden för att statistiskt undersöka insamlad data. Metoden lämpar sig för mindre populationer av data.

7.2. RESULTAT

Ur de tillgängliga data går det inte med statistisk prövning varken bevisa eller förkasta den angivna hypotesen, då underlaget är för litet för medge en statistisk prövning.

7.3. BEGRÄNSNINGAR

Här nedan listas olika begränsningar som kan ha påverkat resultatet.

7.3.1 BRISTANDE MÄNGD BELASTNINGSDATA

Antalet plattbelastningsprov som utfördes var begränsat. Det utfördes totalt 4 stycken plattbelastningsprov och togs 4 stycken makadamprov. Detta är, som beskrivs i 7.1, inte tillräckligt underlag för att kunna styrka eller förkasta vår hypotes. Orsaken till den begränsade mängden belastningsdata, var en missbedömning av antalet värden som kunde produceras ur ett plattbelastningsprov.

7.3.2 UNDERGRUNDENS EFFEKTER

Plattbelastningsprov utfördes på en konstruktion som är sammansatt av olika beståndsdelar, exempelvis överbyggnad, undergrund etc. De olika beståndsdelarna är inte oberoende av varandra, vilket gör att man ej kan skilja på makadamens bidrag till elasticiteten och undergrundens bidrag.

7.3.3 UTTORKNING AV MAKADAMPROVERNA

Trots en skyndsam hantering av makadamproverna, så kan inte viss risk för uttorkning uteslutas. Detta då viss uttorkning förmodats ha skett efter friläggningen av makadamen, samt genom ej fullständig luftborttagning i påsarna.

8. SAMMANFATTNING

I detta kapitel behandlas vilken slutsats som kan dras av det utförda arbetet samt det givna resultatet diskuteras.

8.1. SLUTSATS

Hypotesen går varken att bevisa eller att förkasta, då det ej finns tillräckligt många mätningar för att kunna påvisa signifikans.

Utöver detta så har det under arbetet framkommit att det inte går att särskilja mellan bidrag till elasticiteten från själva makadamen och från undergrunden. Detta gör att in-situ mätningar ej kan påvisa hypotesen, även med tillräckligt många mätningar.

8.2. KOMMENTAR/DISKUSSION

I vårt arbete kunde vi inte med basis på datan dra några slutsatser. En intressant aspekt, som inte lyfts mer än såhär, är om det resultat vi får fram fyller sin funktion?

Eftersom effekten av fuktens påverkan på makdamen möjligtvis ej på ett framgångsrikt sätt går att skilja från övriga effekter, så kan man ställa sig frågan om detta är ens eftersträvansvärt?

De laboratorieförsök som ligger till grund för slutsatsen att finmaterial påvisar att fukt i kombination med finmaterial har en effekt. Det som kan vara intressant är gränsvärden för när kombinationen av vatten och finmaterial har en påtaglig negativ effekt på bärigheten. Men är detta nödvändigt för att bedöma om en konstruktion bör bytas eller behållas?

Som tidigare nämnts, så tydde jämförelsen med gränsvärdena för elasticitet som satts av Trafikverket att det undersökta objektets elasticitetsvärden översteg gränsvärdet. I nästa steg kan det vara intressant att veta vad det är i konstruktionen som ej håller måttet, då kostnaden för att grundförstärka och byta undergrund vida överstiger kostnaden för att byta ut makadamen. I ett

sådant läge kan det vara intressant att ha ett gränsvärde för hur mycket fukt och finmaterial som får finnas i makadamen.

Om man vid en provgrop kan säkerställa att undergrundens bärrighet ej överstiger gränsvärdet för elasticitet, då blir bärrigheten hos makadamaterialet sekundärt: det är den åtgärd man kan utföra för att få godkända värden enbart ett byte av makadamen.

9. KÄLLOR

- Améen, M. och Möller, J. (2005). Regionaltrafikens renässans – exemplet Öresundsregionen. I Järnvägen 150 år, red. Rosander et. al., s.188 – s. 199. Stockholm: Informationsförlaget.
- Andersson-Skog, L. och Ottosson, J. (2005). ”Hela folkets järnväg” och marknaden. I Järnvägen 150 år, red. Rosander et. al., s.12 - s 23. Stockholm: Informationsförlaget.
- Bårström, S. och Granbom, P. (2012) Den svenska järnvägen. Trafikverket
- Chandra, S. och Agarwal, M.M. (2007) Railway Engineering. Oxford University Press.
- Dawson, A. (2008). Water in Road Structures - Movement, Drainage and Effects. Nottingham: University of Nottingham
- Fröidh, O. (2005). Nytt liv med järnvägen. I Järnvägen 150 år, red. Rosander et. al., s.166 - s 187. Stockholm: Informationsförlaget.
- Granhage, L. (2009). Kompendium i vägbyggnad. Göteborg: Avdelningen för geologi och geoteknik. Chalmers tekniska högskola
- Göteborgs Spårvägar (2013). Historik. <http://www.sparvagen.goteborg.se/> (2013-06-14)
- Göteborgs Spårvägar (2013) Årsredovisning 2012. <http://www.sparvagen.goteborg.se/> (2013-06-14)
- Hammarson, Stig (1979). Zeppelinare, Limpor och Mustangar – spårvägen i Göteborg 100 år. Malmö: Frank Stenvalls Förlag.
- Hedström, R. (2004) Spårvägens infrastruktur – En förstudie. Linköping: VTI notat 47-2004
- Rosander et al. (2005). Järnvägen 150 år. Stockholm: Informationsförlaget.

- Spårvagnsstäderna (2013). Planerade utbyggnader i Sverige.
<http://sparvagnsstaderna.se/planerade-utbyggnader-i-sverige> (2013-06-14)
- Svensson, J. (1997). Fuktmätning i väg: en kunskapsöversikt samt utveckling av en enkel fuktmätningstrustning. Linköping: Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- Sällfors, G. (2009) Geoteknik, 4:e upplagan. Göteborg
- Teknisk Handbok (2013). 2KC2 Produktkrav <http://www.th.tkgbg.se/sv-se/projektering/2kmark%C3%B6verbyggnader/2kcmakadamballastf%C3%B6rsp%C3%A5rv%C3%A4g/2kc2produktkrav.aspx> (2013-08-15)
- Trafikverket (2012). TRVMB 112 - Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat. Borlänge: TRV 2012:050.
- Transit gloria mundi (2011). Trolley - The Cars That Built Our Cities.
http://www.transitgloriamundi.com/trolley_videos/trolley/narration.html. (14 Jun 2013)
- Vägverket (1993). Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning, Metodbeskrivning 606:1993. VV Publ. nr 1993:19
- Vägverket. (2005). ATB VÄG 2005 – Kapitel E Obundna material. Borlänge: VV Publ 2005:112.

MUNTLIGA REFERENSER:

Boberg, Peter. Personlig intervju, Projektör Göteborgs spårvägar, avdelning Banteknik, flera intervjuer utförda 2013.

Olsson, Jan. Personlig intervju, Arbetsledare Göteborgs spårvägar, avdelning Banteknik, våren 2013.

Petterson, Bosse. Personlig intervju, Arbetsledare Göteborgs spårvägar, avdelning Banteknik, våren 2013.

BILAGA I

Resultat från torkning, vid varje mätplats togs två prover på olika djup.

Prov-ID	Innan tork	Efter tork		Vatten(g)	Fukthalt(%)	
	Vikt - innehåll (g)	Vikt - totalt (g)	Vikt - behållare (g)			Vikt - innehåll (g)
1-1	896,50	1036,50	143,60	892,90	3,60	0,402
1-2	837,60	969,70	139,00	830,70	6,90	0,824
2-1	1078,60	1212,80	139,50	1073,30	5,30	0,491
2-2	977,90	1118,20	144,90	973,30	4,60	0,470
3-1	1190,30	1328,90	144,20	1184,70	5,60	0,470
3-2	911,40	1043,40	135,90	907,50	3,90	0,428
4-1	1297,80	1435,80	143,30	1292,50	5,30	0,408
4-2	1005,80	1146,80	145,90	1000,90	4,90	0,487

Medelvärden för mätplatser

	Medelvärde(g)	Medelvärde(%)
1	5,25	0,613
2	4,95	0,481
3	4,75	0,449
4	5,1	0,448

Prov nr. AMS-2130682

Objekt: Nr 8302218972 Södravägen mellan Berzelig. -Engelbrek	Provtagningsdatum: 2013-09-18	Provtagare: SVEVIA/KUNGÄLV/LAB AMIR RAJABI
Beställare(enhet): Göteborgs spårvägar / Karl Lampinen	Märkning: Spårvagns spår	Underlag: Makadam under belägg mellan spår

SAMMANSTÄLLNING AV PLATTBELASTNING MÄTRESULTAT (VVMB 606)

Punkt NR	SEKTION	EV1 (MN/m ²)	EV2 (MN/m ²)	EV2/EV1	Anteckningar:
1	Punkt 1 Södra vägen	27,16	83,22	3,06	
2	Punkt 2 Södra vägen	48,24	126,91	2,63	
3	Punkt 3 Södravägen nära Engelbrek.	31,90	96,68	3,03	
4	Punkt 4 sögravägen nära Berzeliga.	36,83	99,97	2,77	

Amir Rajabi



Underskrift är med elektronisk signatur

Telefon nr
0303-587 00
Telefax nr
0303-938 05

Besöksadress
Motorgatan 1
Styrelsens säte
SOLNA

Svevia AB
Väglaboratorium
Motorgatan 1
442 40 KUNGÄLV

E-post adress
amir.rajab-i-jalal@svevia.se
Internetadress
www.svevia.se