

# Fallvänlig asfalt för gång- och cykelbana

En studie kring inverkan av tid, gummiinblandning och lagringsförhållande  
på hållfastheten



**LUNDS**  
**UNIVERSITET**  
Lunds Tekniska Högskola

**LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg**  
**Institutionen för trafik och väg**

**Examensarbete**

Ashraf Al Saidi

Ghulam Murtaza Begzad

Lund, 2021

© Copyright Ashraf Al Saidi, Ghulam Murtaza Begzad

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg

Lunds universitet

Box 882

251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering

Lund University

Box 882 SE-251 08 Helsingborg

Sweden Tryckt i Sverige

Media-Tryck

Biblioteksdirektionen

Lunds universitet

Lund 2021

## Sammanfattning

Det svenska cykelvägnätet utgörs av cirka 22 800 km väg. Dessa är fördelade på statliga cykelvägar (cirka 2800 km eller 12,29 procent), kommunala cykelvägar (cirka 18 900 km eller 82,89 procent) och enskilda cykelvägar (cirka 1100 km eller 4,82 procent). Idag är singelolyckor ett stort problem inom trafiksäkerheten för gående och cyklister. I statistiken om allvarligt skadade i transportsystemet mellan 2006 och 2017 syns att mellan 1 600 – 2 200 personer skadades i samband med cykel som transportmedel och mellan 1 800 – 3 700 fotgängare skadades. En av åtgärderna för att minska konsekvensen vid olyckor är användandet av fallvänlig asfalt. Dock är detta en ny produkt och mycket är ej ännu undersökt med denna typ av beläggning.

Syftet med examensarbete är att skapa ett underlag som kan fungera som stöd vid försök att hitta den optimala arbetsrecept för den fallvänliga asfalten. Resultatet från examensarbetet skall kunna användas för att förbättra det befintliga arbetsreceptet.

Arbetet fokuserade på en litteraturstudie där relevanta publicerade rapporter och texter studerades. Därefter genomfördes undersökningar i laboratorium där fem olika asfaltbeläggningar i form av cylindriska provkroppar framställdes och testades. Beläggningarna bestod av referens (ABT8) och fyra olika gummiblandningar, med olika mängd förbehandlat gummi, olika tider mellan asfaltblandningen och tiden för förbehandlingen av gummi. Dessa kompakterades och Marshallstabiliteten testades för provkroppar efter 1, 7 respektive 14 dygn, samt för provkroppar lagrade i luft respektive i vatten. Experimentella mätningar genomfördes också i arbetet med syftet till att beräkna kompaktdensiteten och hålrumshalten för beläggningarna.

Resultatet visar att gummiasfalten har, oberoende av sort, en betydligt lägre styvhet jämfört med referensen (ABT8). Framställnings- och testmetoden är inte utvecklad för denna typ av beläggning och kanske därför är inte representativ innan den utvecklats vidare.

Slutsatser som kan dras av litteraturstudien är:

- Den fallvänliga asfalten kan minska skadegrad då den är fyra till fem gånger mjukare än den vanliga asfalten.
- Den fallvänliga beläggningen kan vara avgörande för att undvika allvarliga skador eller åtminstone lindra konsekvenserna av fallolyckor.
- Relationen mellan bitumen och gummit behöver studeras med mycket noggrannhet då gummit suger upp en viss del av bitumen under förbehandling av modifierad bitumen vilket är okänt.
- Livslängden är inte bestämt då beläggningen är fortfarande under utveckling.

Baserad på laboratoriestudie dras följande slutsatser:

- Marshallstabilitetstestet är inte användbar för gummibeläggningar i sin nuvarande utformning.
- Analys av resultatet för hållfastheten i de båda studerade punkter är nästa lika vilket kan utnyttjas vid en vidare utveckling av Marshallstabilitetsmetoden.

- Temperaturen spelar en avgörande roll vid blandning och kompaktering.
- Förbättring i kompaktering av provkropparna kan ske via mer antal slags eller mer gildmassans vikt

Nyckelord:

Gång- och cykelbanor, gummi-asfalt, modifiering, gummigranulat, bitumen, Marshallstabilitet, hållrumshalt.

# Abstract

The Swedish cycle path network consists of approximately 22,800 km roads. These are divided into state cycle paths (about 2,800 km or 12.29 percent), municipal cycle paths (about 18,900 km or 82.89 percent) and individual cycle paths (about 1,100 km or 4.82 percent).

Today, single accidents are a major problem in road safety for pedestrians and cyclists. The statistics on serious injuries in the transport system between 2006 and 2017 show that approximately 1,600 – 2,200 people were injured with bicycles as a means of transport and about 1,800 – 3,700 pedestrians were injured. One of the methods to reduce the severity of falling accidents is the use of fall friendly pavement. This type of pavement is relatively new though and requires further investigation.

The purpose of this thesis is to create a foundation that can serve as support when trying to find out the optimal work recipe for the fall-friendly asphalt. The results of this project can be used to improve the existing work recipe.

This thesis focused on a literature study where relevant published reports and texts were studied. Subsequently, research was carried out in the laboratory where five different asphalt mixtures in the form of cylindrical bodies were produced. These consisted of one reference (ABT8) and four different rubber mixtures, with different amounts of pre-treated rubber material, with different times between pre-treatment and asphalt mixing, either 0 hours or 24 hours. These were compacted and the Marshall stability were tested for the asphalt mixtures after 1, 7 and 14 days respectively. Also investigated was the impact of dry storage in air and storage in water. Experimental methods were also carried out with the aim of measuring the compact density and air voids content of the mixtures.

The results show that the rubber asphalt has a significantly lower stiffness compared to the reference (ABT8). The method of production is not developed for this type of asphalt and may therefore not be representative until further development.

Conclusions that can be drawn from the literature study are:

- The fall-friendly asphalt can reduce the degree of damage as it is four to five times softer than the usual asphalt.
- The fall-friendly asphalt can be operative to avoid serious injury or at least mitigate the consequences of falls.
- The relationship between bitumen and rubber needs to be studied with a lot of accuracy as the rubber absorbs a certain part of bitumen during the pre-treatment of modified bitumen which is unknown.
- The lifespan is not determined as the asphalt is still in development.

Based on laboratory study, the following conclusions are drawn:

- The Marshall staple test is not useful for rubber asphalt in its current design.
- Analysis and results of stiffness in both points is almost similar which can be used then in the further development of the Marshall stability method.

- Temperature plays an important role in mixing and compacting.
- Improvement in compaction of the impactors can be obtained through increasing the number of compacting, or the weight of the hammer.

#### Keyword

Walking and cycling paths, rubber asphalt, modification, rubber granules, bitumen, Marshall stability and air voids content.

## Förord

Det här examensarbetet motsvarar 22,5 hp och är vår slutgiltiga del av utbildningen i högskoleingenjörsutbildning Byggteknik väg och trafikteknik på Lund Tekniska Högskola, Campus Helsingborg, Lund universitet. Arbetet utfördes under vårtermin 2021 i samarbete med RISE och Peab asfalt AB. Vi vill tacka Kenth Johansson, senior projektledare RISE och Viveca Wallqvist, seniorforskare RISE för deras stöd, engagemang och till deras bidrag till med gummi och beställning av material. Ett väldigt tack till Martin Rydh, Laboratorieföreståndare, Peab asfalt AB Helsingborg för blandning, provning, information och diskussion kring arbetet.

Ett väldigt stort tack till vår handledare Sara Janhäll, senior forskare, RISE och Joacim Lundberg, teknisk doktor för deras värdefulla kunskap, alla stöd, uppmuntran och diskussion. Vi vill tacka Joacim specifikt för hjälpen under utförande av labbtester, för svar på alla frågor dygnets runt och uppföljning av arbetet på helhet. Vi vill rikta ett stort tack till Sara för hjälpen med analys, diskussion, disposition av arbetet och idéer.

Vi vill tacka vår examinator Ebrahim Parhamifar, samt ett stort tack till Per Tyllgren och Pajtim Sulejmani då de anslöt oss till vår handledare.

Slutningen skickar vi våra varma hälsningar och tack till våra familjer här och på alla andra ställen.

Ashraf Al Saidi & Ghulam Murtaza Begzad

Juni 2021

# Innehållsförteckning

<b>1 Inledning</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Bakgrund</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Syfte med arbetet</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Avgränsningar</b> .....	<b>2</b>
<b>1.4 Arbetets delar</b> .....	<b>3</b>
<b>1.5 Förväntat resultat</b> .....	<b>3</b>
<b>1.6 Frågeställningar</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Utformning och dimensionering av gång- och cykelvägar</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 Cykelnätets uppbyggnad</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2 Utrymmesbehov för gående respektive cyklister</b> .....	<b>4</b>
<b>2.3 Separering av gående och cyklister</b> .....	<b>4</b>
<b>2.4 Dimensionering av gång- och cykelvägar</b> .....	<b>5</b>
<b>2.5 Överbyggnadslager</b> .....	<b>6</b>
<b>2.5.1 Bitumenbundet slitlager</b> .....	<b>6</b>
<b>2.5.2 Bundet bärlager</b> .....	<b>6</b>
<b>2.5.3 Obundet bärlager</b> .....	<b>7</b>
<b>2.5.4 Förstärkningslager</b> .....	<b>7</b>
<b>2.5.5 Skyddslager</b> .....	<b>7</b>
<b>2.6 Faktorer som påverkar tillverkningsprocessen</b> .....	<b>7</b>
<b>2.7 Vanligaste beläggningarna för gång- och cykelvägar i Sverige</b> .....	<b>8</b>
<b>2.8 Allmänt om asfaltbeläggningar</b> .....	<b>8</b>
<b>2.8.1 Bindemedel</b> .....	<b>8</b>
<b>2.8.2 Ballast</b> .....	<b>9</b>
<b>2.8.3 Filler</b> .....	<b>9</b>
<b>2.8.4 Hålrums halt</b> .....	<b>9</b>
<b>2.8 Asfaltbeläggningstyper</b> .....	<b>10</b>
<b>2.8.1 Tankbeläggningar</b> .....	<b>10</b>
<b>2.8.2 Massabeläggningar</b> .....	<b>10</b>
<b>2.9 Tillsatsmaterial till asfaltbetong</b> .....	<b>10</b>
<b>2.9.1 Fibrer</b> .....	<b>11</b>
<b>2.9.2 Polymerer</b> .....	<b>11</b>
<b>2.9.3 Vidhäftningsmedel</b> .....	<b>11</b>
<b>2.10 Drift och underhåll av gång- och cykelbanor</b> .....	<b>11</b>



2.10.1 Drift- och underhållsåtgärder .....	12
2.10.2 Standardkrav för cykelvägar .....	13
2.10.3 Standardkrav för underhållsåtgärder och barmarksdrift .....	13
2.10.4 Vinterdrift .....	14
2.10.5 Belysning .....	15
<b>3 Gummigranulat och förlåtande beläggningar på gång- och cykelbanor .....</b>	<b>16</b>
3.1 Gummigranulat.....	16
3.1.1 Definition.....	16
3.1.2 Gummigranulats egenskaper .....	16
3.1.3 Återvinningsprocessen av fordonsdäck.....	17
3.1.4 Gummigranulats användningsområden .....	17
3.1.5 Historisk användning av gummi i asfaltbeläggningar .....	18
3.1.6 Krav på gummigranulat i gummiasfalt.....	18
3.1.7 Gummigranulat utifrån miljöperspektiv .....	19
3.1.8 Tillverkning av gummigranulat från däck .....	19
3.1.8.1 Krossning i omgivningstemperatur .....	19
3.1.8.2 Låg-/kryotemperaturprocess .....	19
3.1.9 Tillverkningsmetoder för gummi modifierat bitumen .....	20
3.1.9.1 Våt tillverkningsmetod.....	20
3.1.9.1.1 Fältblandning .....	21
3.1.9.1.2 Terminalblandning .....	21
3.1.9.2 Torra tillverkningsmetoden.....	22
3.2 Förlåtande beläggningar på gång- och cykelbanor .....	22
3.2.1 Livslängd för förlåtande beläggningar.....	24
3.2.2 Prioritering av platser för utläggning av förlåtande beläggning .....	24
<b>4 Metoder och genomförande av laboratoriestudien .....</b>	<b>25</b>
4.1 Blandningar .....	25
4.2 Tillverkning av provkroppar .....	27
4.2.1 Arbetsgång och utförande .....	28
4.3 Beräkning av hålrums halt.....	30
4.3.1 Skrymdensitet .....	30
4.3.2 Kompaktdensitet .....	32
4.4 Marahallstabilitetstest .....	34
4.5 Observationer och anmärkningar under genomförande .....	35
4.5.1 Observationer och anmärkningar under tillverkningen av provkroppar ....	35

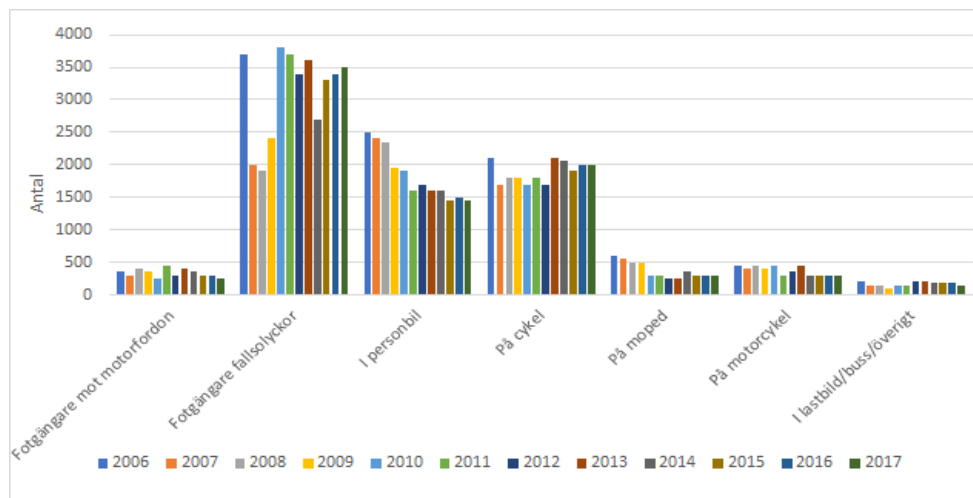
4.5.2 Observationer och anmärkningar under Marshallstabilitetstest, beräkning av skrymdensitet och sektionsmätning.....	35
4.5.3 Åtgärder under tillverkning av provkroppar .....	39
5 Resultat .....	40
5.1 Skrymdensitet.....	40
5.2 Hålrums halt.....	40
5.3 Hållfasthet (Styvhet) .....	42
5.3.1 Hållfastheten beräknat utifrån punkt 1 (simulera standarden vid högsta lasten).....	43
5.3.2 Hållfastheten beräknad utifrån punkt 2 (simulera standarden utifrån kurvans utseende vid högsta lasten) .....	46
5.3.3 Skillnad i hållfasthet utifrån de två beräkningspunkterna .....	50
6 Diskussion.....	51
6.1 Skrymdensitet.....	51
6.2 Hålrums halt.....	51
6.3 Temperatur.....	52
6.4 Hållfasthet.....	52
6.5 Metoddiskussion.....	54
7 Slutsatser .....	56
7.1 Slutsatser baserade på litteraturstudien .....	56
7.2 Slutsatser baserade på laboratoriestudien.....	57
8 Rekommendationer för fortsatta studier .....	59
9. Referenslista:.....	60
10 Bilagor.....	64

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Utveckling och förbättring av transportinfrastrukturen behövs för att uppnå transportpolitiska-, klimat- och hälsomål såsom funktionsmål<sup>1</sup> och hänsynsmål<sup>2</sup>. Trafikverket, kommuner och regioner har vissa krav på utformning, funktion och användning av transportsystemet. För att uppnå ovanstående mål behöver cykel- och gång infrastruktur prioriteras då cykling är positivt för hälsan, resulterar i mindre utsläpp av koldioxid från vägtrafiken och medför mindre intrång i trafikmiljön (RISE, 2018). I Sverige beräknas cykling utgöra 10 % av allt resande (Svensk Cykling, 2018).

Det svenska cykelvägnätet utgörs av cirka 22 800 km. Dessa är fördelade på statliga cykelvägar (cirka 2800 km eller 12,29 procent), kommunala cykelvägar (cirka 18 900 km eller 82,89 procent) och enskilda cykelvägar (cirka 1100 km eller 4,82 procent) (SKR, 2021). Idag är singelolyckor<sup>3</sup> ett stort problem inom trafiksäkerheten. I statistiken om allvarligt skadade i transportsystemet mellan 2006 och 2017 syns att mellan 1 600 – 2 200 personer skadades i samband med cykel som transportmedel och mellan 1 800 – 3 700 fotgängare skadades (se Figur 1) (Trafikverket, 2019).



Figur 1: Antal allvarligt skadade i transportsystemet mellan 2006–2017 (Trafikverket, 2019).

<sup>1</sup> “Funktionsmålet innebär att transportsystemets utformning, funktion och användning ska medverka till att ge alla en grundläggande tillgänglighet med god kvalitet och användbarhet samt bidra till utvecklingskraft i hela landet” (Trafikverket, 2021).

<sup>2</sup> “Hänsynsmålet innebär att transportsystemets utformning, funktion och användning ska anpassas till att ingen ska dödas eller skadas allvarligt, bidra till att det övergripande generationsmålet för miljö och miljö kvalitetsmålen nås samt bidra till ökad hälsa” (Trafikverket, 2021).

<sup>3</sup> En singelolycka är en trafikolycka där ett fordon är inblandat (STR Media AB, 2004).

År 2013 dog cirka 1 662 personer, och över 270 000 sökte akut sjukvård efter att ha skadats i fallolyckor<sup>4</sup> i trafik- och idrottsmiljöer med en total kostnad på 24,6 miljarder kronor (Schyllander, 2014).

Trafikverket, i samarbete med andra relevanta organisationer som till exempel polismyndigheten och transportsstyrelsen, jobbar mot att nollvisionen<sup>5</sup> ska uppnås och att transportsystemet ska anpassa efter människors förutsättningar. Som åtgärd har det tagits upp exempelvis viltstängsel, vägräcken, hastighetsbegränsning o.s.v. för att minska antal dödade i motortrafiken (RISE, 2018). För att förebygga fallolyckor hos oskyddade trafikanter genomförs snöröjning och halkbekämpning av trottoarer och cykelvägar som åtgärd under vintertiden (Schyllander, 2014).

Fokus i detta arbete är att undersöka egenskaper för en typ av asfaltbeläggning på gång- och cykelvägar som är mer förlåtande och stötupptagande än en vanlig asfaltbeläggning. Denna asfalt tillverkas genom att en del av ballasten (stenmaterialet) ersätts av återvunnet gummigranulat från uttjänta bildäck. Asfalten kan minska skaderisken då den är fyra till fem gånger mjukare jämfört med den vanliga asfalten (RISE, 2018). Dessutom kan asfalten användas på andra ytor, till exempel utanför äldreboende, där risken för fallolyckor är stor. För lite forskning har gjorts medan den optimala fallvänliga asfalten behöver utvecklas mer. Asfalten har vissa fördelar utifrån miljöaspekter, eftersom gamla fordonsdäck delvis återanvänds i vägbeläggningen istället för att gå till förbränning i energiverk (RISE, 2020).

Denna typ av asfalt som i detta arbete undersöks har i andra studier tillverkats och prövats på två korta cykelsträckor i södra respektive mellan Sverige, men har uppnått varierande resultat, där den ena beläggningen fungerade som tänkt och den andra inte blev likvärdig med den första. En möjlig anledning kan vara variationer i blandning av asfaltmassa, variationer i förbehandling av gummi, variationer i arbetsrecept eller variationer i material användande. Detta arbete handlar om att undersöka mängden gummi i beläggningen, förvaringsförhållanden samt hur egenskaperna gällande stabilitet utvecklas över tid.

## **1.2 Syfte med arbetet**

Syftet med examensarbete är att skapa ett underlag som kan fungera som stöd vid försök att hitta den optimala arbetsrecept för den fallvänliga asfalten. Resultatet från examensarbetet skall kunna användas för att förbättra det befintliga arbetsreceptet.

## **1.3 Avgränsningar**

Detta arbete fokuserar på två olika mängder gummi som har förbehandlats med bitumen och som sedan jämförs med en referens. Därefter undersöks hur lagringsförhållanden (torr eller våt lagring) och tid har påverkat stabiliteten.

---

<sup>4</sup> Fallolycka är en vanlig olycka som sker bland fotgängare vilken leder till flest dödsfall (Schyllander, 2014).

<sup>5</sup> Utgångspunkten för nollvisionen är det etiska ställningstagandet att ingen ska dödas eller skadas allvarligt i trafiken (Trafikverket, 2021).

## **1.4 Arbetets delar**

Arbetet består av två olika delar. Den första delen fokuseras på litteraturstudier där relevanta publicerade rapporter och texter studeras och utnyttjas. Andra delen är bestående av undersökningar i laboratorium där fem olika asfaltprovkroppar framställas och testas från en referens (ABT8) och fyra olika blandningar.

## **1.5 Förväntat resultat**

I detta arbete förväntas den optimala beläggningen utifrån arbetsreceptet som kan ge den bästa önskade resultatet för den fallvänlig gång- och cykelbeläggningen. Utvecklingen och spridningen av denna typ av beläggning, om önskat resultat uppnås kan potentiellt leda till mer fallvänliga beläggningar och därmed bidra till minskade skador vid falloolyckor.

## **1.6 Frågeställningar**

Följande frågeställningar har undersökts i detta arbete:

- Vilka egenskaper har den fallvänliga asfalten?
- Hur bidrar asfalt med gummigranulat till en hållbar utveckling och ökad trafiksäkerhet?
- Vad är skillnaden mellan gummiasfalt och vanlig asfaltbeläggning med avseende på arbetsrecept, funktionalitet, dimensionering och livslängd?
- Vilka faktorer kan påverka beläggningens hållbarhet?
- Kan den nuvarande standardmetoden för styvhetstest används för denna typ av gummibeläggning?

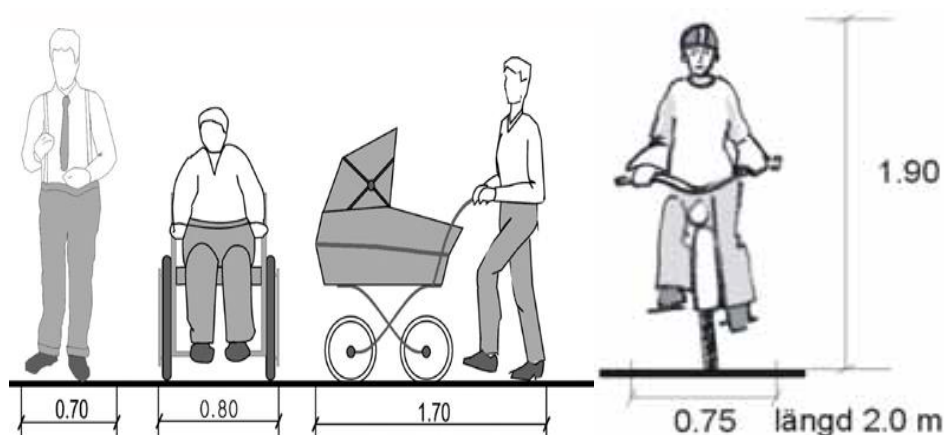
## 2 Utformning och dimensionering av gång- och cykelvägar

### 2.1 Cykelnätets uppbyggnad

Cykelnätet delas in i två olika typer av nät, huvudnät och lokalnät. Huvudnät är består till största delen består av separerade cykelvägar och knyter ihop stadsdelar med andra målpunkter, till exempel sjukhus, universitet, och större arbetsplatsområden. Dessa används ofta av cyklister som cyklar längre avstånd inom tätorter. Lokalnät knyter ihop olika målpunkter inom stadsdelen, till exempel lokalt centrum, enskilda affärer och bensinstationer, och omfattar cykelvägar och lokalgator som ofta används av cyklister som cyklar kortare avstånd. Vid nybyggnad av cykelnät är lokalisering av verksamheter och målpunkter inom omfattning i (3–5 km) viktigt att beakta. Det kan även leda till att öka antal cyklister (SKL, 2015).

### 2.2 Utrymmesbehov för gående respektive cyklister

Utrymmesbehov för gående (till exempel med barnvagn, rullstol, ledsagare eller ledarhund) och cyklister varierar utifrån ålder och typ av hjälpmedel i bredd, längd och höjd. För några exempel på utrymmesbehov, (se Figur 2) (SKL, 2010)



Figur 2: Utrymmesbehov för fotgängare och cykel (Trafikverket, 2016).

### 2.3 Separering av gående och cyklister

Enligt Vägverket (2004) vid användning av samma gaturum för gående och cyklister är det viktigt att fundera på separering mellan trafikslagen, särskilt om:

- Sträckan används av många gående och cyklister med höga krav på tillgängligheten vilket innebär att trafikanter når målpunkter utan hinder.
- Antalet oskyddade trafikanter som samtidigt använder sträckan är hög, d.v.s. mer än 200 cyklister och 200 gående per timme eller mer än 300 cyklister och 50 gående per timme.
- Det finns särskilda behov, till exempel många yngre barn, äldre eller funktionshindrade som använder banan.

- Siktförhållandena är inte bra, till exempel om innerkurvor och skymmande hinder finns.
- Sträckans utformning leder till att cyklister håller högre hastighet mer än normalt (Vägverket, 2004).

## 2.4 Dimensionering av gång- och cykelvägar

Vid dimensionering av vägöverbyggnader finns generellt många faktorer att beakta. Vissa särskilda faktorer som ska tas hänsyn till vid dimensionering av gång- och cykelväg är klimatfaktorer som nederbörd och fukt, befintliga markförhållanden som materialtyp och dess hållfasthet och stabilisering (Agardh, Parhamifar, 2014).

I Trafikverkets kravdokument, TRVK väg (Trafikverket, 2011) och TDOK Bitumenbundna lager (Trafikverket, 2020) finns tekniska beskrivning för dimensionering av överbyggnaden för olika typer av svenska vägkonstruktioner.

Dimensionering av överbyggnaden för gång- och cykelvägar liknar dimensioneringen av överbyggnaden för andra typer av vägar, dock med andra lagertjocklekar. För att välja rätt beläggning är det viktigt att definiera vilka funktionsegenskaper som bör prioriteras. Gällande gång- och cykelvägar bör flexibilitet, åldringsresistens och jämnhet prioriteras (Asfaltboken, 2013).

Gång- och cykelvägar brukar dimensioneras för 150 000 standardaxlar<sup>6</sup> gällande trafikbelastning (Trafikverket, 2011). Om vägen i stället trafikeras av enstaka fordon med högst åtta tons axellast, ska överbyggnaden i stället dimensioneras efter en enstaka last om 40 kN. Denna last ska vara jämnt fördelad över en kvadratisk yta med sidor om 200 mm (se Figur 3).



Figur 3: Enstaka last för överbyggnad till GC-väg, med en axellast mindre än eller lika med 8 ton (Trafikverket, 2011).

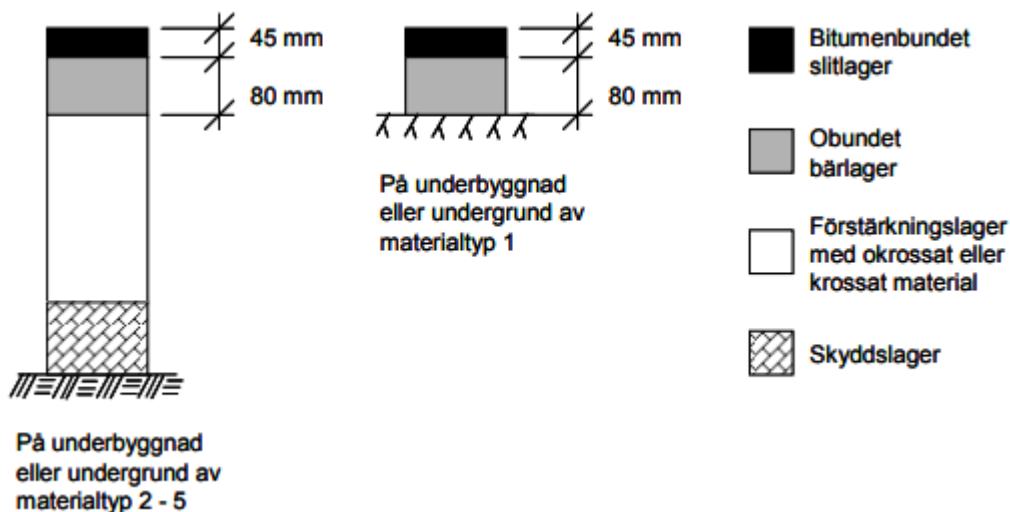
Överbyggnaden för gång- och cykelväg bör vara överdimensionerad. Anledningen till detta är underhållsfordon och uttryckningsfordon som kan köra på gång- och cykelvägar samt för att

<sup>6</sup> Standardaxeln är en fiktiv axel med parmonterade hjul och med 100 kN axellast jämnt fördelad mellan hjulen. Varje hjul har en cirkulär kontaktyta mellan däck och väg. Varje kontaktyta är belastad med ett konstant tryck på 800 kPa. Hjulen i respektive hjulpar har ett inbördes centrumavstånd på 300 mm (Trafikverket, 2005).

förhindra tjälskador och skador till följd av trädrötter i belägningen. Livslängden för gång- och cykelvägar kan nå mer 20 år med hänsyn tas till belastningar. Cykelvägar kan byggas ut av betong, asfalt, grus eller jord och varierar med avseende på livslängd och kostnader i drift- och underhållsarbete. Utifrån väderförhållandena mellan olika länder som till exempel Sverige, USA och Australien, är det vanligt att Sverige använder asfaltbetong i stället för cementbetong som till exempel används i Australien. Med hänsyn till underhållskostnaderna blir generellt betongkonstruktionen billigare än asfaltkonstruktionen i Australien. För att öka uppmärksamheten hos trafikanterna kan färgade ytor användas. Dessa ytor kan uppnås med hjälp av termoplastisk färg ovanpå ytan, färgad asfalt eller pigmenterad slamförsegling (Niska, 2011).

## 2.5 Överbyggnadslager

Överbyggnaden består av ett antal materiallager med föränderlig funktion som syftar till att säkerställa att vägen förbi säker, bärig och beständig under inverkan av klimat och trafikbelastningar (Agardh och Parhamifar, 2014). För gång- och cykelvägar består överbyggnaden av ett slitlager, eventuellt ett bundet bärlager, ett obundet bärlager, ett förstärkningslager och eventuellt ett skyddslager (se Figur 4).



Figur 4: Uppbyggnad av överbyggnad till gång- och cykelväg, mått i mm (Trafikverket, 2011).

Dessa olika lager med dess funktioner beskrivs vidare nedan.

### 2.5.1 Bitumenbundet slitlager

Det översta lagret utgörs av asfaltbetong/asfaltmassa. Lagret har uppgift till att ge en god friktion, en jämn yta, att avleda vatten från ytan, samt att skydda de underliggande lagren från vatten (Agardh och Parhamifar, 2014).

### 2.5.2 Bundet bärlager

Ett bundet bärlager används endast om gång- och cykelvägen är minst 2,5 m bred och har en tjocklek på 50 mm. Vid användning av ett sådant lager ska slitlagrets tjocklek vara 30 mm



istället för 45 mm (Täby kommun, 2020), (samma information hittat ej på en annan källa). Lagret har till uppgift att fördela trafikens belastningar till underliggande lager.

### **2.5.3 Obundet bärlager**

Det obundna bärlaget består av krossat stenmaterial i form av grus som syftar till att fördela belastningarna från ovanliggande lager till underliggande lager och bidrar till goda hållfasthetsegenskaper som beständigheten som är avgörande i överbyggnadens livslängd ur bärighets synpunkter (Agardh och Parhamifar, 2014).

### **2.5.4 Förstärkningslager**

Förstärkningslaget består av okrossat eller krossat material och har samma funktion som det obundna bärlaget gällande fördelning av lasten. Lagret kan även fungera som ett dränerande lager som ska leda bort vatten från vägkonstruktionen till avvattningsystemet (Agardh och Parhamifar, 2014).

### **2.5.5 Skyddslagret**

Skyddslaget läggs direkt på terrassytan och har två uppgifter för att skydda väggkroppen. Den första uppgiften är att förhindra att underliggande material tränger upp i förstärkningslaget. Den andra uppgiften är att skydda väggkroppen från tjäle (Agardh och Parhamifar, 2014).

## **2.6 Faktorer som påverkar tillverkningsprocessen**

Tillverkningsprocessen kan påverkas av olika faktorer vilket kan leda till oönskade resultat på beläggningen (Agardh och Parhamifar, 2014). Dessa faktorer kan vara:

- Temperatur vid tillverkning, d.v.s. högre än 120 °C när det sker som massabeläggning.
- Arbetsrecept som är ett bindande dokument mellan tillverkare och beställare och innehåller information om typ av massa, kornstorleksfördelningskurva, bindemedelstyp- och halt, kompakt- och skrymdensitet, och eventuella tillsatser.
- Transportering som har krav gällande restiden från verket till arbetsplatsen.
- Transportförhållanden d.v.s. om lastbilen har möjlighet att täcka asfaltmassan och undvika separationer av massan med hjälp av konkav låda.
- Klimatfaktorer som temperatur, frost, regn och fukt.
- Befintliga markförhållande och de i beläggningen ingående materialens hållfasthetsegenskaper.
- Utläggning som omfattar underlag till temperaturförhållande, utläggningsmaskiner och väderförhållanden (Agardh och Parhamifar, 2014).
- Sist men inte minst att gång- och cykelbanor bör vara överdimensionering då vägen kan belastas av drift- och underhållsfordon och utryckningsfordon, samt för att förhindra tjälskador och skador till följd av trädrötter i beläggningen (Niska, 2011).

## 2.7 Vanligaste belägningarna för gång- och cykelvägar i Sverige

Vid nyanläggning av gång- och cykelvägar är tät asfaltbetong (ABT) den vanligaste belägningen vilket är en varmblandad massabelägning. Den används som justerings-, bind- och slitlager vid nybyggnad samt vid underhållsåtgärder. Utifrån den befintliga konstruktionen och tillståndet på gång- och cykelvägar föreslås även andra belägningstyper vid underhållsarbete. Den första typen är tunnskiktsbelägning (TSK) som är ett alternativ för åldrad belägning då den täcker över den gamla ytan och gör den tät och vattenavvisande med en mindre stenfraktion med storlekar på 4 mm eller 8 mm. Den andra typen är en slurrybelägning (slamasfalt) som används i olika situationer, till exempel vid åtgärdande av åldrade- och vittrade belägningar. Slamasfalt omfattar två typer av belägningar med olika användningsområden:

- Slamförsegling är en belägning med stenfraktion 0–2 mm som används i gång- och cykelvägar, på torg och för bostadsgårdar.
- Slambelägning är en belägning med stenfraktion 0–4 eller 0–8 mm som används på ytor som eventuellt trafikeras med biltrafik (SKL, 2010).

Slitlagret kan läggas direkt på obundna lager, men för att få starkare konstruktionstyp rekommenderas andra alternativ, det vill säga att bygga det enligt Trafikverkets krav på vägkonstruktioner, TRVK väg. Under en tät asfaltbetong (ABT) eller en tunnskiktsbelägning kan ett asfaltgrus (AG), asfaltgrus med mjukbitumen eller indränkt makadam (IM) läggas som bundet bärlager för att förstärka konstruktionen (SKL, 2010).

## 2.8 Allmänt om asfaltbelägningar

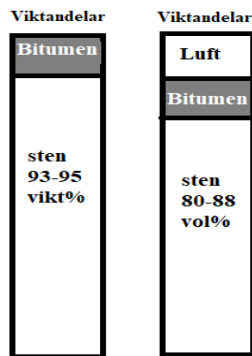
Historiskt fanns naturasfalt tillgänglig för brytning i naturen (Asfaltboken, 1999). Människor brukade använda denna naturasfalt med olika sammansättning av trä, tegel och sten som byggnadsmaterial för byggnader och för väg- och gatubelägningar. Numer används bituminösa bindemedel istället för naturasfalt i väg- och gatubelägningar. Bitumen framställs genom destillering av råolja. En asfaltbelägning består vanligen av ett bindemedel, ballast, fyller och eventuella tillsatser (Agardh och Parhamifar, 2014). Dessa beskrivs mer nedan.

### 2.8.1 Bindemedel.

I asfaltbelägningar brukar bitumen användas i dagsläget. Bitumen är en biprodukt av olja som består av partiklar av kolföreningar, lättflytande kolväten och oljor. Bitumen har flera funktioner i en belägning, inklusive att hålla ihop massan, samt har egenskaper som vidhäftningsförmåga, motstånd mot vatten och resistens mot kemikalier. Bitumen fungerar även som smörjmedel vid utläggning och packning och skyddar stenmaterialet från krossning och påverkan av klimatet samt ger belägningen lastfördelande förmåga. Bitumen har olika krav, bland annat gällande penetration vid 25 °C, mjukpunkt, viskositet och beständighet. Vanligen används två typer av bitumen: 70/100 och 160/220, där 70/100 respektive 160/220 står för penetrationstalet hos bitumen. Exempelvis betyder 70/100 att penetrationstalet varierar från 70 till 100 decimillimeter. Dock beror användningen på klimatet och belägningens funktion med syftet att undvika deformationer eller sprickor (Agardh och Parhamifar, 2014).

## 2.8.2 Ballast

Ballasten består vanligtvis av krossat stenmaterial av olika storleksfraktioner (t.ex. 0–2, 2–4, 4–8, 8–11, 11–16 mm) som ger ett starkt stenskelett och en högre hållfasthet. Stenmaterial har också krav gällande kornkurvan, flisighetsindex, kulkvarnsvärde och krossytegrad. För en normal beläggningssmassa beräknas mängden stenaggregat till cirka 95 viktprocent respektive 88 volymprocent grund av hålrumshalt i beläggningen (se Figur 5) (Agardh och Parhamifar, 2014).



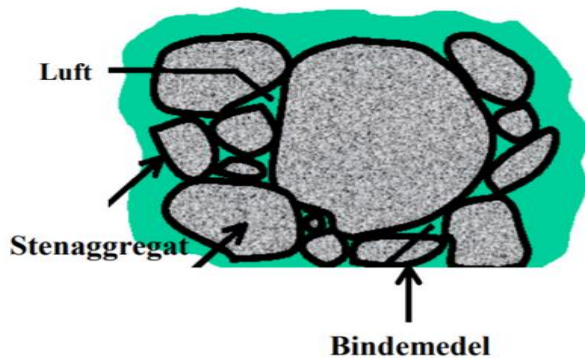
Figur 5: Volym- och viktförhållanden för en normal beläggningssmassa (Agardh och Parhamifar, 2014).

## 2.8.3 Filler

Filler har två funktioner: dels att fylla upp hålrummen med bitumen, dels att styva upp bitumen, d.v.s. öka mjukpunkten. Till exempel har 70/100 bitumen en mjukpunkt mellan 43 – 51°C, vilken då ökar vid tillsättning av filler (Trafikverket, 2015).

## 2.8.4 Hålrumshalt

En annan aspekt som påverkar är hålrum. Hålrummet i asfaltbetong är utrymmet mellan stenarna och bindemedlet (se Figur 6). Detta har betydelse då hög hålrumshalt medför lägre stabilitet, ökat slitage genom stensläpp och ökad deformationsbenägenhet, medan låg hålrumshalt medför ökad risk för blödning, lägre friktion, en speglade yta och risk för plastiska deformationer (Agardh och Parhamifar, 2014). Enligt Trafikverkets krav för bitumenbundna lager varierar hålrumshalten för en tät asfaltbetong (ABT) mellan 1,5 – 4,4 vol.-% med avseende på bindemedelstyp och den största stenfraktionen (Trafikverket, 2015).



Figur 6: Hålrums halt i massan (Parhamifar, 2019).

## 2.8 Asfaltbeläggningstyper

Enligt Agardh och Parhamifar (2014) delas asfaltbeläggning in i huvudtyperna tankbeläggningar och massabeläggningar. Dessa beskrivs nedan.

### 2.8.1 Tankbeläggningar

Tankbeläggningar tillverkas på plats vilket innebär att stenmaterial och bitumen inte blandas före utläggning, och det krävs inga höga temperaturer. Tankbeläggningar kan i sin tur vidare delas in i:

Indränkt makadam där stenmaterial först läggs ut och därefter sprids bitumenemulsion med hjälp av spridartank ut på ytan, för att därefter packas med hjälp av en vält.

Ytbehandling där bitumen läggs ut på ytan först, följt av sten som därefter packas med hjälp av en vält. Ytbehandling förekommer som enkla, dubbla och spårytbehandling.

### 2.8.2 Massabeläggningar

Massabeläggningar tillverkas vid hög temperatur (>120 °C) i asfaltverk genom att blanda bitumen med specifik krossat stenmaterial av olika fraktioner och transporteras därefter till arbetsplatsen. I denna kategori ingår olika typer av asfaltbetong (AB) och asfaltgrus (AG). Med avseende på sammansättningen kan massabeläggning huvudsakligen delas in i två grupper: tät och öppen (dränerande) beläggning. Asfaltgrus (AG) och tät asfaltbetong (ABT) är verkblandade asfaltmassor med kontinuerliga kornfraktioner (Agardh och Parhamifar, 2014).

## 2.9 Tillsatsmaterial till asfaltbetong

För att förbättra en eller flera egenskaper hos en beläggning, såsom beständighet, flexibilitet och stabilitet hos bitumen, används tillsatsmaterial, bland annat fibrer, polymerer och vidhäftningsmedel (Asfaltboken, 2020).

### **2.9.1 Fibrer**

Tillsättning av fibrer (till exempel mineralfiber, cellulosafiber, glasullsfiber) vid hög bindemedelshalt under tillverkningsprocess minskar risken för bindemedelavrinning ur beläggningsmassor såsom asfaltbetong stenrik (ABS) och asfaltbetong dränerande (ABD) (Asfaltboken, 2020).

### **2.9.2 Polymerer**

Polymerer är högmolekylära föreningar som kan blandas in i bitumen, vilket benämns som PMB (Polymermodifierat bitumen), eller i asfaltmassan, vilket benämns som PMA (Polymermodifierat asfaltmassa) (Asfaltboken, 2020). För tillverkning av PMA tillsätts polymererna med stenmaterialet innan blandningen av asfaltmassa i asfaltverket. Polymerer delas in i olika grupper utifrån sina egenskaper, till exempel elastomerer, gummigranulat och plastomerer (Nordiska vägtekniska förbundet, 2006). Syftet med tillsättning av polymerer till asfaltbeläggning är att minska temperatur känsligheten, att göra beläggningen mer tålig mot spår- och sprickbildning och för att öka elasticiteten hos asfaltbeläggningen, samt för att öka bitumens viskositet (Persson m.fl., 2006).

Även tillsats av gummi till asfaltbeläggningar kan ge fördelar gällande säkerhet, till exempel kan det ha betydelse för skadegraden vid fall på gång- och cykelvägar. En annan potentiell fördel är gällande miljö, då gamla uttjänta däck kan omvandlas till gummigranulat för användning i beläggningen i stället att det energiåtervinns (bränns i energiverk) eller går till deponi (RISE, 2020).

### **2.9.3 Vidhäftningsmedel**

Tillsättning av vidhäftningsmedel utförs för att förbättra beständigheten och hållbarheten hos asfaltbeläggning och därigenom uppfylla motsvarande krav. Det är relativt vanligt att vidhäftningsmedel blandas i redan vid asfaltverken, även om det ibland sker på plats vid utläggning. Vidhäftningsmedel finns i olika varianter som Amininer, Etylenaminer och Diaminer (Persson m.fl., 2006).

## **2.10 Drift och underhåll av gång- och cykelbanor**

Drift och underhåll har stor betydelse för cyklisternas säkerhet och komfort samt en avgörande roll vid valet av färdmedel. Säkerheten påverkas direkt och indirekt av vägens förhållande. Brister i drift och underhåll kan leda till cykelolyckor och avleda uppmärksamheten kring övriga trafikanter. För att underhålla cykelvägar på ett kostnadseffektivt sätt kräver att dimensioneringen sker enligt anvisning med bra kvalitet gällande bundna och obundna lager, samt att hänsyn tas till fordon som kan tänkas köra på gång- och cykelvägar. Drift och underhållsarbetet är avgörande utifrån ett säkerhetsperspektiv och bör förbättras av väghållaren via rutiner. Detta leder till upptäckten av skador i ett tidigt skede (Niska, 2011).

Mellan 2007 – 2012 skadades cirka 44 000 cyklister, där 8 400 olyckor klassades som allvarliga (Ljungblad och Zajc, 2014). Cirka 90 % av totala antalet cykelolyckor inträffar i

tätorter. Singelolyckor utgör den största andelen med 78 %. Brister i drift och underhåll ligger bakom en tredjedel av samtliga cykelolyckor, och bland singelolyckorna är 44 % drift- och underhållsrelaterade. Tabell 1 visar fördelningen för drift- och underhållsrelaterade olyckor gällande cykelolyckor som lett till allvarliga skador. Enligt Ljungblad och Zajc (2014) inträffar 85 % av singelolyckorna på vägsträckor eller gång- och cykelbanor, 8 % inträffar i korsningar eller cirkulationsplatser och 10 % av singelolyckor som lett till allvarliga skador har samband med samspel med andra trafikanter. Ojämnt underlag, trottoarkanter och andra kanter med koppling till vägbanan står bakom var femte singelolycka (Niska, 2011).

Tabell 1. Fördelningen av drift- och underhållsrelaterade cykelolyckor för singelolyckor. Summering av procenttal är mer än 44 procent på grund av att speciella olyckor kan förklaras med flera orsaker (Ljungblad och Zajc, 2014).

Olyckstyp	Procent allvarligt skadade
Halka - is/ snö	20 %
Halka - grus	10 %
Halka - löv	2 %
Halka - lera	0,1 %
Halka - övrigt/okänt	4 %
Ojämnt underlag	8 %
Kört på tillfälligt föremål	3 %
Kommit utanför vägen/ väggkant	3 %

### 2.10.1 Drift- och underhållsåtgärder

Driftåtgärder riktar sig till att upprätthålla de funktionella egenskaperna som eftersträvas för cykelvägar. Driftåtgärder omfattar spricklagning, ogräsbekämpning, sopning, snöröjning och halkbekämpning. Underhållsåtgärder riktar sig till att återställa cykelvägskonstruktionen till sitt ursprungliga skikt med sina ursprungliga egenskaper eller för förbättring av specifika egenskaper. Underhållsåtgärder omfattar exempelvis läggning av en ny beläggning för förbättring av dränering (Niska, 2006).

Användning av materialavskiljande lager till exempel fiberduk kan förhindra blandning mellan bärlager och undergrundsmaterial, vilket kan minska framtida underhållskostnader. Det är viktigt att sprickor (som kan leda till krackelering) och slaghål (potthål) (vilka är de vanligaste skador som sker för gång- och cykelvägar) åtgärdas så fort som möjligt utifrån ett säkerhetsperspektiv för cyklister. För att underlätta drift- och underhållsarbete nyttjas

väderinformation från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) eller via Trafikverkets vägväderinformationssystem (VViS) (SKL, 2010).

### 2.10.2 Standardkrav för cykelvägar

Utifrån intervjuer med 13 cykelkommuner bland annat Borlänge, Gävle, Göteborg, Helsingborg, Kristianstad, Linköping, Luleå, Lund, Malmö, Umeå, Västerås, Växjö och Örebro, uppgavs att dåvarande Vägverkets standard för cykelbanor inte är tillräcklig, och det inte finns budget för att uppfylla de standardkrav som fanns. Det påpekades även att standarden inte var tillämpbar när det gäller andra förhållanden i tätorten. Några kommuner tyckte att krav på standarden inte skulle gälla alla kommuner, vilket betyder att varje kommun skulle ha egna krav utifrån sina egna förutsättningar och ambitionsnivåer (Niska, 2006).

Gällande krav på konstruktionen vid nybyggnation av gång- och cykelvägar följde nästan alla kommuner samma dimensionerings principer som återfinns in ATB VÄG/VÄG 94.

Undersökning visade att Vägverkets standardkrav följs med avseende på totala överbyggnadens tjocklek medan materielinnehåll och tjockleken för de ingående skikten kan ändras. Överbyggnadens totala tjocklek visade sig variera mellan olika kommuner. Ett sådant exempel är för Helsingborg kommun med 300 mm och är för Borlänge kommun med 700 mm, med hänsyn till i markförhållande mellan de olika kommunerna (Niska, 2006).

### 2.10.3 Standardkrav för underhållsåtgärder och barmarksdrift

Standardkraven gällande underhållsåtgärder och barmarksdrift är olika mellan olika kommuner. Umeå var den enda kommun av de tretton undersökta kommunerna som delvis följde dåvarande Vägverkets riktlinjer gällande barmarksdrift. När det gällde val av underhållsåtgärder var det bara Borlänge kommun som följde dåvarande kommunförbundets föreskrifter. Dessa föreskrifter inkluderar ”Bära eller Brista” (SKR, 2019) eller ”I valet och kvalet”, vilket ersätts med ”val av åtgärd” (SKR, 2019). Övriga kommuner har i stället egna föreskrifter för att upprätthålla standarden på cykelvägar (Niska, 2006).

Underhållsåtgärder genomförs vid behov och sker först och främst utifrån inspektioner, direkta anmälningar från cyklister eller enligt fasta rutiner såsom asfaltprogram och/eller funktionsbeskrivningar. Underhållsåtgärder tas även upp baserad på vägledande tillståndskrav i funktionsbeskrivningar. Ett sådant exempel är tillståndskraven för sprickor på cykelvägar i några kommuner, se Tabell 2, och för maskinsopning, se Tabell 3 (Niska, 2006).

Tabell 2. Tillståndskrav för cykelvägar i några kommuner gällande sprickans bredd som skulle åtgärdas, samt tid och typ för åtgärden (Niska, 2006).

Kommun	Göteborg	Helsingborg	Västerås	Örebro
Sprickor	> 10 mm, åtgärdas årligen	5 – 10 mm, åtgärdas före 1 oktober	> 10 mm, ska tätas	> 10 mm, ska tätas

Tabell 3. Standardkrav för maskinsopning av cykelvägar i några kommuner (Niska, 2006).

Kommun	Göteborg	Helsingborg	Västerås	Örebro
Sopning gång- och cykelvägar	1 gång/ 2 veckor + lövsopning	1 gång/1 mån – 2 gånger/år + 2 extra vid lövfällning	3 gånger/år + extra vid lövfällning	2 gånger/år + lövsopning vid behov

#### 2.10.4 Vinterdrift

När det gäller vinterväghållning har ingen av de tretton intervjuade kommunerna egna standardkrav. Cykelvägar prioriteras enligt primärt och sekundärt cykelvägnät, och ofta informeras cyklisterna om vilka cykelvägar som skall prioriteras i vinterväghållningen genom kartor i kommunernas hemsidor, annonsering i tidningar och/eller markering med särskilda färger i cykelkartor. Hänsyn till temperatur, snökvalitet och tidskrav tas i några av kommunerna, där ett sådant exempel är Umeå kommun som har målet att alla cykelvägar skulle vara röjda före kl. 6.30 respektive kl. 16.30. Gävle kommun önskar att erbjuda högre krav gällande driftstandard vintertid för cyklister vilket behöver budget och kommunen har inte ekonomiska möjligheter. För att starta snöröjning vid 2 cm snödjup skulle det leda till extra kostnader om 500 000 kronor per år. Ett exempel på standardkrav för vinterdrift av prioriterade cykelvägar för några kommuner ges i Tabell 4 (Niska, 2006).

Tabell 4. Standardkrav för vinterdrift av de prioriterade cykelvägarna (Niska, 2006).

Kommun	Göteborg	Helsingborg	Västerås	Örebro
Start - snöröjning	-	4 cm	3 – 5 cm	3 – 5 cm
Halkbekämpning	Via stenkross (2 – 5 mm), vid halka eller alltid efter snöröjning	Via krossad kalksten (0 – 6 mm) med viss saltinblandning	Via kubisk stenkross (2 – 5 mm) utan saltinblandning	Via kubiserat stenkross (2 – 4 mm), vid behov och alltid efter snöröjning



### **2.10.5 Belysning**

Vägbelysning är ett behov för att kunna förflytta sig under mörka förhållanden. Belysningen gör det möjligt att se vägar, eventuella ojämnheter, kanter och hål. Gällande stadsplaneringsprocessen bör belysning för gång- och cykelvägar prioriteras (Trafikverket, 2014). Trots att belysning är viktigt, finns det inte lagar som ska fastställa om den ska finnas eller hur den ska utformas. Belysning bör finnas på större tätorter och på områden som känns otrygga under mörka förhållande. Belysning har en viktig roll för förbättring av tillgänglighet, trygghet och säkerhet under mörka förhållanden vilken också ökar trivsel och trygghetskänsla på gång- och cykelvägar (Niska, 2011).

## 3 Gummigranulat och förlåtande beläggningar på gång- och cykelbanor

### 3.1 Gummigranulat

#### 3.1.1 Definition

Gummigranulat tillverkas genom rivning av gamla däck vid olika temperaturer. Gällande gummimodifierat bitumen sker tillverkningen i omgivningstemperatur (Nordgren, 2011). Gummigranulat består i huvudsak av 99,9 % svart gummigranulat, samt mindre än 1 % färgat gummigranulat, metall och textil (Genan, 2020).

#### 3.1.2 Gummigranulats egenskaper

Gummigranulat som används i detta arbete har transporterats in från ett danskt företag Genan. För att gummit ska bli användbar gjorde företaget olika testmetoder på dess egenskaper vilka framgår i tabell 5.

Tabell 5. Gummigranulats egenskaper (Genan, 2021).

Egenskaper	Testmetoder	Enhet	Specifikation	Typiskt värde
Specifik densitet	ASTM D1817-05(2016)	kg/m <sup>3</sup>	1,100–1,200	1,160
Skrymdensitet	EN 1097–3:1998	kg/m <sup>3</sup>	465 ±8%	465
Kornstorlek interval	ISO 13322–2:2006	%	2,0–6,0	2,0–6,0
Total polymer halt	ISO 9924–3:2009	%	≥ 40	45
Ask	ISO 9924–3:2009	%	<15	8
Fuktig (torkning förlust, 2 timmar vid 105 °C)	ASTM D1509 - 15	%	≤ 1	≤ 1
Fria metaller	OA-698	%	≤ 0,004	≤ 0,002
Fibrer	OA-698	%	≤ 0,002	≤ 0,001
Färgade gummi partiklar	OA-698	%	≤ 0,1	<0,04
Övrig förorening	OA-698	%	≤ 0,004	≤ 0,002
Klassificering i förhållande till inandningsbart damm	EN 15051–2:2013+A1:2016		Ganska låg till låg	Ganska låg

PAH 8 REACH	AfPS GS 2019:01 PAK	mg/kg	≤ 20	<15
-------------	------------------------	-------	------	-----

### 3.1.3 Återvinningsprocessen av fordonsdäck

Återvunna däck, oavsett om dem kommer från personbil eller lastbil, består av naturgummi, syntetiskt gummi, stål, textil, fillers (kolsvart Silica) och olika andelar antioxidanter (Ardefors och Roupe, 2019). Varje år samlas det in ungefär 95 000 ton utslitna däck och behandlas i en av de sju behandlingsanläggningar som finns i Sverige. Utslitna däck indelas till olika ändamål bland annat export (1 %), återanvändning via regummering (0.05 %), materialersättning (5 %), materialåtervinning (34 %) och energiutvinning (59%), (se Figur 7). Av material som går till materialåtervinning så är 20% återvunnen textil, 15% återvunnet stål och 65% gummigranulat som går till fotbollsplaner, gummiasfalt och övriga ändamål (RagnSells Däckåtervinning AB, 2019).



Figur 7: Återvinningsprocess av fordonsdäck i hela Sverige. Figuren används med tillåtelse av skaparna (Ragn - Sells Däckåtervinning AB, 2019).

### 3.1.4 Gummigranulats användningsområden

Gummigranulat är ett av de material som återvinns ur utslitna däck. Med dess fjädrande egenskaper används gummigranulat inom flera områden. Gummigranulat används som fyllnadsmaterial i konstgräsplaner som därmed får en viss sviktande egenskap. Detta är ett av de vanligaste och mest kostnadseffektiva material för konstgräsplaner vilket minskar risken till skador. Gummigranulat används även som lager ovanpå sanden i ridbanor vilket ger mjukare underlag med mindre belastning och skaderisk för hästen (Ragn-Sells, 2018a). Under de senaste åren har gummigranulat även börjat användas i gång- och cykelbeläggningar, vilket kan leda till att lindra skador vid fall (RISE, 2018a).

En livscykelanalys utförd av Rang-Sells, Svensk Däckåtervinning och Norsk Dekkretur visade att användande av återvunna däck som fyllnadsmaterial ger ett lägre koldioxidutsläpp, lägre inverkan på försurning och användande av jordbruksmark jämfört med andra alternativa material. Ett exempel som nämns är att vid tillverkning av gummigranulat för en fotbollsplan släpps 52 ton koldioxid ut, medan koldioxidutsläppet från användandet av andra material är högre, exempelvis etenpropengummi (EPDM) som släpper ut 77 ton koldioxid och termoplastiskt gummi (TPE) som släpper ut 65 ton koldioxid. Inblandning av gummigranulat i bitumenet förbättrar bitumenegenskap för binda ihop stenen (Ragn-Sells, 2018). Fältstudier och laborationsundersökningar har visat att användning av gummi-asfalt inte har högre risk för miljön jämfört med den vanliga asfalten, samt indikerar att gummi-asfalten fungerar på högtrafikerade vägar, till exempel E6 mellan Vellinge- Petersborg (Viman, 2011). Användandet av gummigranulat gör att asfalten får en svartare färg och får mer elastiska egenskaper. Detta innebär att risken för sprickbildning på grund av tjäle minskar och att gummibeläggning absorberar värmestråle som gör att is på vägbanan smälter snabbare (Ragn-Sells, 2018).

### **3.1.5 Historisk användning av gummi i asfaltbeläggningar**

Användande av gummi-asfalt började i Arizona, USA, med syfte att öka beläggnings livslängd, minska bullergenereringen och minska sprickor i cementstabiliserade lager. Både i Sverige och i USA har det utförts flera studier gällande inverkan av gummi i asfaltbeläggningar på den omgivande miljön och arbetsmiljön (Viman, 2011).

Baserad på svenska förhållanden har Trafikverket sedan 2006 studerat och provat gummi-asfalten (Viman m.fl., 2014). Rapporten visar att mellan 2007 - 2013 har det tillverkats mer än 150 000 ton gummi-asfalt som har lagts ut i mer än 150 km utspritt på 20 vägsträckor i Sverige. Syftet med provsträckorna var att se om tekniken är användbar för de nordiska väderförhållandena (Viman, 2009). Erfarenheter från provsträckorna har visat några positiva effekter såsom ökad livslängd, lägre utsläpp av partiklar, minskat buller och förebyggande av farliga ämnen som lakas ur gummit när det blandas med bindemedlet.

I tillverkning av gummi-asfalten användes en våt teknik där inblandning utgörs av cirka 17 procent gummigranulat med storlek 0–1 mm i bitumen, vilket sedan blandas med stenmaterial för att ta fram olika massabeläggningar (Viman m.fl., 2014).

### **3.1.6 Krav på gummigranulat i gummi-asfalt**

Gummigranulaten som ingår i tillverkning av gummimodifierat bitumen för bilvägar och/eller gummi-asfalt bör uppfylla följande krav (Nordgren, 2011):

- Gummigranulatet storlek ska vara 0 - 1 mm.
- Andelarna av stål och andra föroreningar i gummigranulaten ska inte vara mer än 0,01 vikt-%.
- Andelen av textil bör inte vara mer än 0,5 vikt-%.
- Gummigranulaten ska ha en specifik vikt på  $1,15 \pm 0,05$  g.
- Ingen fukt i gummigranulaten eftersträvas, men fukten ska ej överstiga 0,2 vikt-%.

### 3.1.7 Gummigranulat utifrån miljöperspektiv

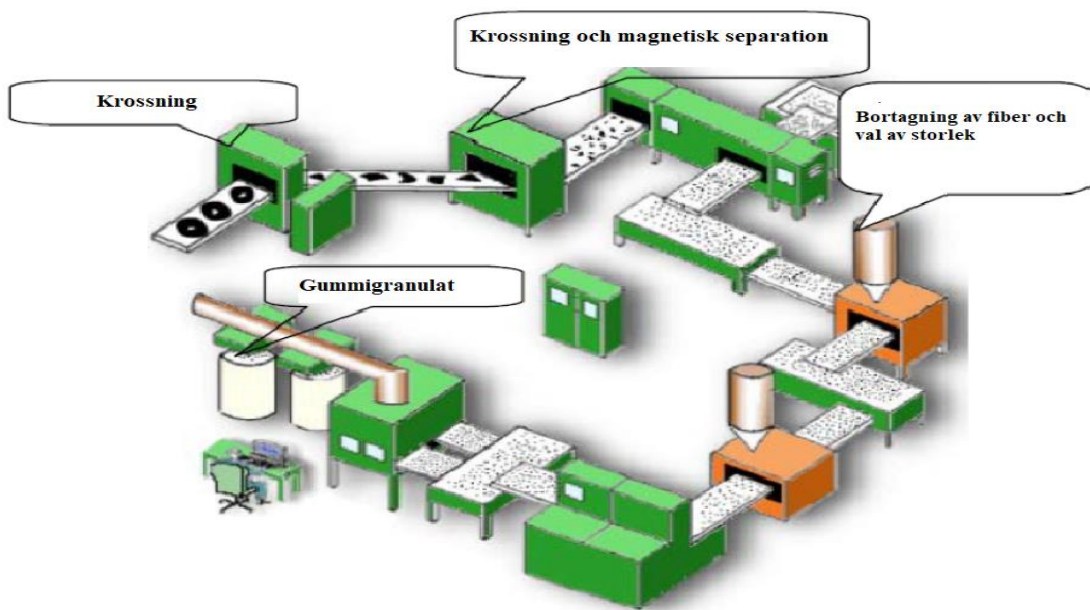
Gummi är en miljö testat material vilket innebär att det inte har en farlig effekt utifrån miljöaspekt (lakhalten för gummigranulaten i vatten underskrider dricksvattenkvalitet ) samt de kemiska ämnen som finns i gummit är hårt bundna, dessutom när gummi blandas med asfalten blir även de kemiska ämnena i gummit tätare. Genom att tillverka en ton gummigranulat från utslitna däck minskas utsläppen av koldioxid med 1678 kg jämfört med om däcken förbränns vid ett energiverk. Det kan därför hävdas att asfaltbetong inblandad med gummi är en klimativänlig beläggning. Gummi-asfalten kan även återvinnas och användas inom två områden: antingen för att skydda bärlager från tjäle i nya konstruktioner, eller för att blandas med ny gummi-asfalt (Massbalans, 2020).

### 3.1.8 Tillverkning av gummigranulat från däck

Enligt Silvrano m.fl. (2006) sker tillverkning av gummigranulat via krossning i omgivningstemperatur eller via Låg-/kryotemperaturprocess vilka beskrivs nedan.

#### 3.1.8.1 Krossning i omgivningstemperatur

De uttjänta däcken rivs och krossas med hjälp av en maskin, en så kallad granulator, som är utrustade med saxar, magneter och siktar (se Figur 8). Via transportband och olika typer av magneter sorteras stål och fibrer från de krossade däcken bort.



Figur 8: Krossningsprocessen i omgivningstemperaturer. Figuren används med tillåtelse av skaparna (Silvrano m.fl. 2006).

#### 3.1.8.2 Låg-/kryotemperaturprocess

Denna process utförs vid mycket låga temperaturer (från  $-87\text{ }^{\circ}\text{C}$  till  $-198\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) genom att däcken doppas i flytande kväve. Däcken blir mycket spröda vid dessa låga temperaturer och

gör det lätt att brytas till önskad storlek med hjälp av tryck. Processen börjar med fragmentering av däck och borttagning av stål. Därefter doppas däckbitarna i flytande kväve (se Figur 9) och transporteras därefter till granulatorerna. I det sista steget i processen tas mineralfibrer och textil av granulaten bort. Denna process ger gummi partiklar i regelbunden form d.v.s. med kantiga ytor jämfört med krossning process (Silvrano m.fl., 2006).



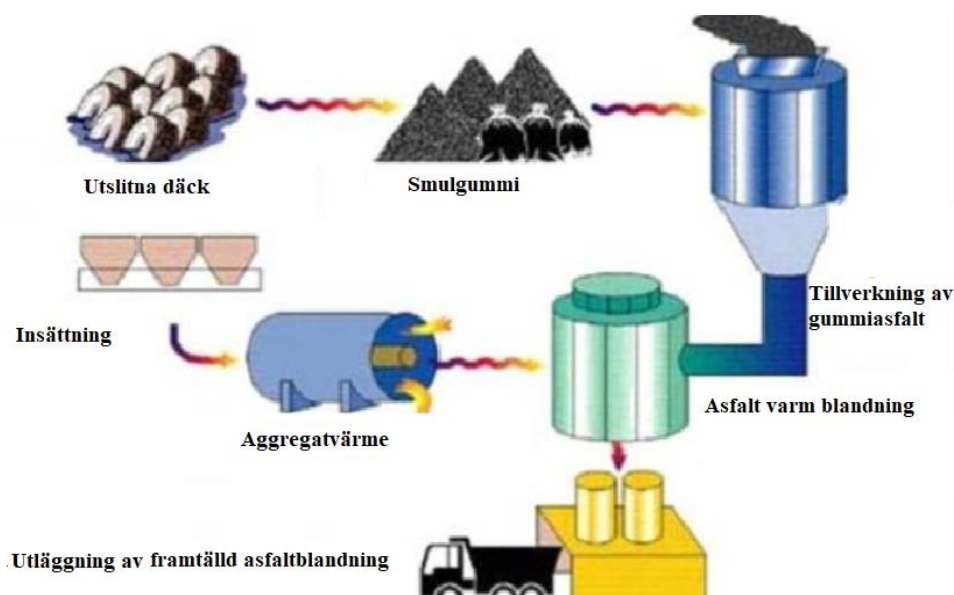
Figur 9: Lågtemperaturprocessen med dess olika steg (Silvrano m.fl. 2006). Figurerna används med tillåtelse av skaparna.

### 3.1.9 Tillverkningsmetoder för gummimodifierat bitumen

Vid tillverkning av gummimodifierat bitumen används en blandningsutrustning som är ansluten till asfaltverket (Nordgren, 2011). Gummimodifierat bitumen tillverkas med två olika metoder indelade i en våt metod och en torr metod (Silvrano m.fl., 2006).

#### 3.1.9.1 Våt tillverkningsmetod

I den våta tillverkningsmetoden värms bindemedlet upp till 190 °C i en blandningstank. Därefter tillsätts gummigranulat med en partikelstorlek mindre än 2 mm. Blandningen, d.v.s. bindemedlet med gummigranulat, ska hållas varmt mellan 1 – 4 timmar med en temperatur av 190 °C, där en mekanisk axel samtidigt blandar om bituminet vilket ska säkerställa att materialen reagerar med varandra. Därefter sker resten av tillverkningsprocessen såsom för vanlig asfalt för att tillverka asfaltmassa (se Figur 10) (Silvrano m.fl., 2006).



Figur 10: Tillverkning av gummimodifierat bitumen med våt process och därefter tillverkning av asfalt. Figuren används med tillåtelse av skaparna (Silvrano m.fl. 2006).

Utrustningen har ett viktigt system som spelar stor roll gällande kontroll av blandningen samt säkerhetsfunktioner vid eventuella avvikelser. Mängden gummigranulat beräknas till ca. 17–20 vikt-% av bitumen, vilket betyder att gummi är ca 1,5 – 2 vikt-% av den totala asfaltmassan vid tillsättning av 8 % gummimodifierat bitumen. Gummigranulaten som kommer från uttjänta bildäck anses lämpliga för denna metod, samtidigt som gummigranulat av rivet industrigummi inte anses vara användbar för denna process eftersom denna typ av gummi utgörs av olika och varierande gummikvaliteter (Viman, 2011).

Tillverkningsmetoden kräver en hög noggrannhet så att gummigranulat, bitumen och andra eventuella komponenter blandas väl, d.v.s. blandningsrörelsen behöver hållas konstant så att gummigranulat inte separeras från bitumen och förväntad viskositet uppnås. Den höga temperaturen vid blandningen möjliggör att en interaktion mellan bitumen, gummigranulat och andra komponenter sker, vilket innebär att gummipartiklarna svullnar bindemedlet som leder till att mer bindemedel kan behövas så att den viskositeten som krävs uppnås. Den våta tillverkningsmetoden kan utföras på två sätt, genom fältblandning och genom terminalblandning (Bandini, P. 2011).

#### 3.1.9.1.1 Fältblandning

Gummimodifierat bitumen förbehandlas genom att tillsätta mellan 18 - 22 vol.-% gummigranulat med bitumen direkt före inblandning av stenmaterialet. Detta sätt tillämpas vid både nya konstruktioner och vid underhållsåtgärder och då normalt som ytbehandling (Cheng, D. m.fl. 2012).

#### 3.1.9.1.2 Terminalblandning

I denna metod förbehandlas det gummimodifierat bitumenet genom tillsättning av 15 – 25 vol.-% gummigranulat med partikelstorlekar mindre 600 µm med varmt bitumen vid raffinaderiet. På grund av att små partikelstorlekar av gummi i blandningen och dess snabbare

interaktion med andra komponenter i massan behöver asfalten inte hållas i rörelse under transporten till arbetsplatsen (Bandini, P. 2011).

### 3.1.9.2 Torra tillverkningsmetoden

I den torra tillverkningsmetoden (se Figur 11) värms stenaggregatet upp till 200 °C. Därefter tillsätts gummigranulat och blandas i cirka 15 sekunder tills blandningen får homogena egenskaper. Sedan tillsätts bitumen i slutet av processen (Silvrano m.fl., 2006).



Figur 11: Tillverkning av gummimodifierad asfalt med den torra metoden. Figuren används med tillåtelse av skaparna (Silvrano m.fl. 2006).

## 3.2 Förlåtande beläggningar på gång- och cykelbanor

Enligt Viveca Wallqvist forskare vid RISE (Research Institute of Sweden) har tanken för förbättring av cykelbanan börjat 2013 med hjälp av inspiration av material på lekplatser med syfte till att minska skador vid fall på cykel- och gångvägar. Flera fördelar sågs med gummi kring att minska isbildning, och förhoppningar kring mindre sprickbildning i beläggning, mindre mängd punkteringar, samt mindre slitage på cykeldäck (Dagens Nyheter, 2021). Mellan 2015 - 2018 har Trafikverket och RISE genomfört ett projekt vid namn ”Nya material för säkra vägbeläggningar för cyklister och fotgängare” (TRV 2015/53 804), där olika beläggningar för säkrare gång- och cykelvägar har prövats (Bjurström, 2020). Dessa beläggningar delades upp i fem olika typer med olika material: gummiasfalt; en referens asfalt; asfalt med modifierat bindemedel; gummibetong; och modifierad lekplatsbeläggning. Syftet med projektet var att ta fram och testa kombinationer av material i olika typer av stötdämpande beläggningar för att åstadkomma en stötdämpande effektbeläggning vilket kan minska eventuella skador på trafikanter (Trivector, 2018). Två olika typer av gummiinblandad asfalt, en så kallade gummibetong och en modifierad lekplatsbeläggning testades i projektet, och olika andel av gummiinblandning i asfalt testades i laboriemiljö under projektet. Beläggningarnas friktion, hårdhet och nötningsbeständighet testades. Dessutom genomfördes testkörning av cyklister som omfattar rullmotstånd, manövrerbarhet, acceleration, inbromsning och väggrepp. Omdömen var positivt gällande jämnhet och bekvämlighet. Resultaten i detta projekt har uppmuntrat företagen att gå vidare



med forskning gällande asfalt med inblandning av gummigranulat och modifierad mjukbitumen. En annan aspekt med beläggningar med gummiinblandning är att vissa entreprenörer har undvikit denna typ av beläggning då det är ett omdiskuterat område utifrån arbetsmiljösynpunkter (RISE, 2018). Det var därför viktigt att hitta metoder som kan utvärdera detta. Beläggningen som tillverkades med den varmblandad metoden medförde rök och lukt av gummi, samt svårigheter med utläggning och få ytan jämn. Med kall blandning nämligen blandning av bitumen och vatten till en emulsion fanns problem och projektet inte lyckades att lägga beläggningen med mer än 2 cm tjocklek. En metod som visade sig fungera var en halvvarm blandning där uppvärmningen av blandning skedde via vattenånga med en temperatur om 80 °C (RISE, 2018a).

På grund av föregående utmaningar har det provats tre olika metoder: kallblandad slurry seal, halvvarm massa och modifierat bitumen. Ett lovande resultat för halvvarm asfalt från laboriestudierna var ett projekt där en teststräcka lades på en cykelväg i mellan Sverige. En halvvarm massa med kornstorleksfördelningskurva 0 – 8 mm lades på en cirka 200 meter lång sträcka på en befintlig cykel- och ridväg. Resultatet av tidigare projekt med gummiinblandning i asfalten har visat att gummit suger upp bituminet, vilket riskerar beständigheten i asfalten p.g.a. ballastsläpp. Därför fokuserade projektet på att utveckla olika metoder för förbehandling av kombinationen mellan gummi och bindemedel. Metoderna var att förbehandlingen sker på laboratorium där gummigranulat blandades med bitumen och sedan vila under olika perioder innan att det blandades med asfalten. För att kunna kontrollera mängden av bitumen som granulaten suger upp, doseras bitumen med olika tider vilket var svårt att hantera. Ett problem inom projektet som uppstod var att det inte fanns något företag som kunde erbjuda bitumenbaserat gummi i Sverige, samt att Sverige behövde mer kunskap om processen, samt utrustning såsom ångturboverk, vilket använder ånga och som visade sig var svårt att reproduceras i labb. Därför genomfördes ett samarbete med en portugisisk aktör (Consulpav) som hade förmågan att förbehandla stora volymer vilket räcker till 200 meter lång sträcka tack vare utrustningar och expertis. Den cirka 200 meter lång sträcka som lades i mellan Sverige delades i fem delar utifrån bitumenhalt (8 – 10 vikt-%) och förbehandlingstyper (d.v.s. i ångturboverket efter justering av parameter eller i Consulpav). Gummigranulaten till de första tre sträckorna förbehandlades i Portugal (Consulpav) med bitumenhalter på 8, 9 och 10 vikt-% och övriga två sträckor förbehandlades i ångturboverk med bitumenhalter på 10 respektive 9 vikt-%. I detta testprojekt lades beläggningen utan underbyggnad. För att minska risken för sprickbildning gjordes en särskilt noggrann vältning på den avsvalnade beläggningen med avseende på gummits elasticitet (RISE, 2018). Den 200 meter lång sträcka har fungerat bra under tre år utan någon vidare påverkan (Dagens Nyheter, 2021).

Ett liknande projekt provades 2020 i söder Sverige på en 300 meter lång sträcka på en befintlig gång- och cykelväg (RISE, 2020). Den nya beläggning som testades via HIC- metod<sup>7</sup> var ungefär fem gånger mjukare än vanlig asfalt vilket betyder att risken för allvarliga skador i huvudet minskar från 100 cm till 20 cm jämfört med vanliga asfalten vilken betyder att konsekvens till en fallskada man får vid höjden 100cm blir lika mycket som 20 cm. Syftet

---

<sup>7</sup> HIC- metod: beskriver sannolikheten att en huvudskada ska uppstå från en kollision (RISE, 2018).

med projektet är att lindra konsekvenserna som sker p.g.a. fallolyckor för gående och cyklister (Massbalans, 2020 a)

Den fallvänliga asfalten bedöms utifrån registrerade skador på sträckan samt hur asfalten beter sig under olika väderförhållande och underhållsarbete. Den nya beläggningen som lades i söder Sverige visade sig dock inte fungera lika bra som den andra beläggning i mellan Sverige, då sprickor började och gummibeläggning förstördes i ytan. En orsak för detta kan vara att gummit absorberade bituminet (Dagens Nyheter, 2021).

### **3.2.1 Livslängd för förlåtande beläggningar**

För den förlåtande asfaltens livslängd beaktas flera krav gällande asfaltens åldrande och sprickor (RISE, 2018a). För att utvärdera den nya beläggningen lades två olika beläggningar i mellan Sverige 2017 och i södra Sverige 2020. Beläggningen i mellan Sverige har fungerat väl efter tre års användande (Dagens Nyheter, 2021). I beläggningen har det uppstått hjulspår p.g.a. att beläggning utsatts för belastning av den tunga trafiken som korsar banan (Bjurström, 2020). Beläggningen i södra Sverige visade sig inte ha liknande egenskaper och bröts ned snabbare än avsett, vilket behöver utvärderas vidare för att dra slutsatser om varför (Dagens Nyheter, 2021).

### **3.2.2 Prioritering av platser för utläggning av förlåtande beläggning**

Olyckor sker inte helt slumpmässigt i trafiksystemet utan vid vissa platser och vid vissa tidpunkter. Då förlåtande beläggning är hypotesen dyrare än vanlig beläggning bör kommuner respektive väghållaren prioritera var det är lämpligt att använda. Prioritering av platser har skett vid analysering av cykelolyckor i kommuner bland annat Göteborg, Uppsala, Örebro, Jönköping, Gävle och Eskilstuna. På grund av skillnader i tillgång till data gällande olyckor från olika kommuner föreslår rapporten ”Förlåtande beläggning på cykelbanor -Var den ska placeras? 2018:52” om viktiga synpunkter som underlag vilka kan hjälpa till kommunerna att välja rätt platser för utläggning av beläggning. Första och främst den förlåtande beläggning rekommenderas för huvudcykelnät, så att olycksdata är mindre än lokalnätet och de kan undersöka till var dem flesta cykelolyckor sker. I andra ställen där kommunen har GIS-resurser (geografiska informationssystem), så det kan kartläggas var exakt olyckor sker. Dessutom i stora cykel och fotgängare flöden tvärs eller längs på cykelvägnätet samt i platser med riskutformning, skarpa kurvor eller backar (Trivector, 2018).

## 4 Metoder och genomförande av laboratoriestudien

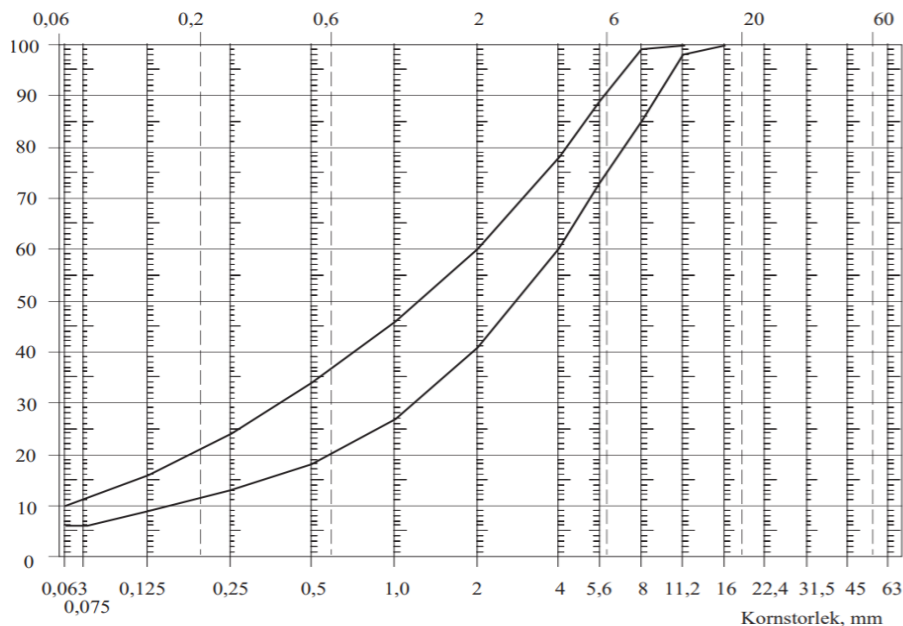
Under arbetet har olika proportioner av gummiinblandning i asfalt tillverkats och testats i laboratoriemiljö, för att skapa ett underlag som kan fungera som stöd vid försök att hitta en mer optimal fallvänlig gummi-asfalt. För den fallvänliga asfalten används två olika mängder av gummigranulat (25 respektive 50 vikt-% ersättning av ballasten med förbehandlat gummi) med olika tidpunkter vid förbehandling av gummi med bitumen och blandning med asfalten (blandning direkt efter förbehandling eller efter 24 timmar). Dessa utsattes för två olika lagringsförhållanden (i luft eller i vatten) och testades efter 1, 7 respektive 14 dygn efter tillverkning av Marshallprovkroppar.

### 4.1 Blandningar

Alla blandningar utfördes enligt Trafikverkets kravspecifikationer för ABT8 med 70/100 bitumen, vilket innebär att ABT8 använts som referens för alla olika tester när det gäller undersökning om att ta reda på inverkan av tiden mellan förbehandling av gummi med bitumen och blandandet till en asfaltmassa. Trafikverkets kravspecifikationer för ABT8 med bitumen typen 70/100 redovisas i Tabell 6, där kornstorleksfördelningen återfinns, som även är illustrerad i Figur 12. Typ och halt för bindemedlet varierar utifrån den största stensfraktionen. Gällande ABT8 med 70/100 bitumen ska halten av bitumen vara mellan 6,4 – 7,0 vikt-% i massan. För denna typ av massa är intervallet för hålrumshalten mellan  $3,5 \pm 1,0$  vol.-% (Trafikverket, 2005).

Tabell 6: kornstorleksfördelning för tät asfaltbetong, ABT 8 (Trafikverket, 2011a).

Sikt mm	0,063	0,5	2	4	5,6	8	11,2
Max, %	10	34	60	78	-	100	100
Min, %	6	18	41	60	-	90	100



Figur 12: Kornstorleksfördelningskurva för ABT8 (Trafikverket, 1994).

En ABT8 och fyra olika blandningar beställdes och utfördes av Peab Asfalt AB, där ABT8 var en standard som agerar referens och övriga fyra varierade med avseende på ersättning av ballast med gummigranulat mer partikelstorlekar mellan 2 – 6 mm vilka förbehandlats med 10 vikt-% bitumen. Denna förbehandling innebar att gummigranulatet blandades med bitumen och beroende på vilken gummi-asfalt tilläts det förbehandlade gummigranulatet att inte vila före blandning till asfaltmassa, eller vila i 24 h före blandningen till asfaltmassa (Se tabell 7). Dessa gummi-asfaltmassor beskrivs i mer detalj nedan:

1. Ballasten ersätts med 25 vikt-% av det förbehandlade gummigranulatet, där 12,5 % av ballasten i fraktion 0 – 4 mm respektive 12,5% av ballasten i fraktion 4 – 8 mm ersattes. Blandningen utfördes direkt efter förbehandlingen, d.v.s. gummigranulatet tilläts ej vila före blandningen till asfaltmassa.
2. Ballasten ersätts med 50 vikt-% av det förbehandlade gummigranulatet, där 25% av ballasten i fraktion 0 – 4 mm respektive 25% av ballasten i fraktion 4 – 8 mm ersattes. Blandningen utfördes direkt efter förbehandlingen, d.v.s. gummigranulatet tilläts ej vila före blandningen till asfaltmassa.
3. Ballasten ersätts med 25 vikt-% av det förbehandlade gummigranulatet, där 12,5 % av ballasten i fraktion 0 – 4 mm respektive 12,5% av ballasten i fraktion 4 – 8 mm ersattes. Blandningen utfördes efter 24 h efter förbehandlingen, d.v.s. gummigranulatet tilläts vila i 24 h före blandningen till asfaltmassa.
4. Ballasten ersätts med 50 vikt-% av det förbehandlade gummigranulatet, där 25% av ballasten i fraktion 0 – 4 mm respektive 25% av ballasten i fraktion 4 – 8 mm ersattes. Blandningen utfördes efter 24 h efter förbehandlingen, d.v.s. gummigranulatet tilläts vila i 24 h före blandningen till asfaltmassa.

Tabell 7. Sammanställning av olika gummiblandningarna.

Blandning	Gummi andel	Ersättning av ballasten med gummit		Vilotid
1	25%	12,5% gummi ersätter 12,5 % ballast med fraktion (0–4 mm)	12,5% gummi ersätter 12,5 % ballast med fraktion (4–8 mm)	0 h
2	50%	25% gummi ersätter 25% ballast med fraktion (0–4 mm)	25% gummi ersätter 25 % ballast med fraktion (4–8 mm)	0h
3	25%	12,5% gummi ersätter 12,5 % ballast med fraktion (0–4 mm)	12,5% gummi ersätter 12,5 % ballast med fraktion (4–8 mm)	24h
4	50%	25% gummi ersätter 25 % ballast med fraktion (0–4 mm)	25% gummi ersätter 25 % ballast med fraktion (4–8 mm)	24h

## 4.2 Tillverkning av provkroppar

Framställning av provkroppar sker antingen i asfaltverk eller på laboratorium, eller via att borra upp de från en beläggning (Trafikverket, 2011). En provkropp ska ha en cirkulär cylinderform med en tjocklek mellan 35 till 75 mm och diametern ska vara  $100 \pm 3$  alternativt  $150 \pm 5$  mm. Det finns olika standardmetoder för att tillverka en provkropp på laboratoriet bland annat,

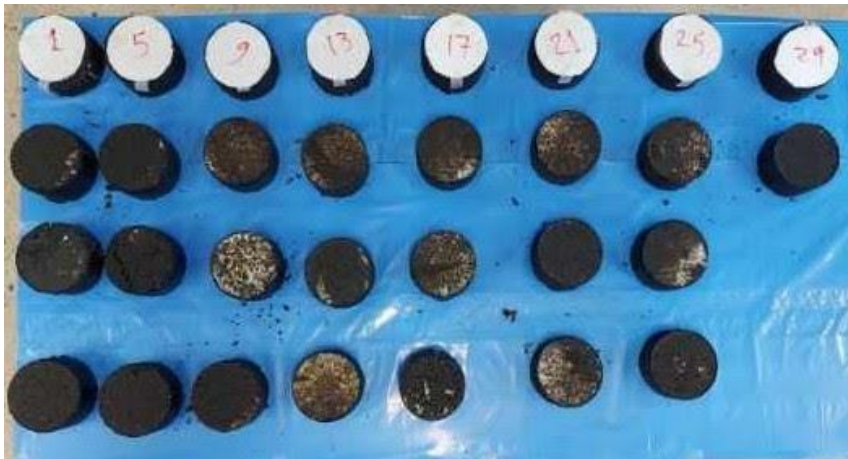
kompaktering av marshallprovkroppar enligt EN 12697–30.

Gyratorisk packning enligt EN 12697–31.

Vibrerande kangohammare enligt EN 12697–32.

Vältmaskin enligt EN 12697–33.

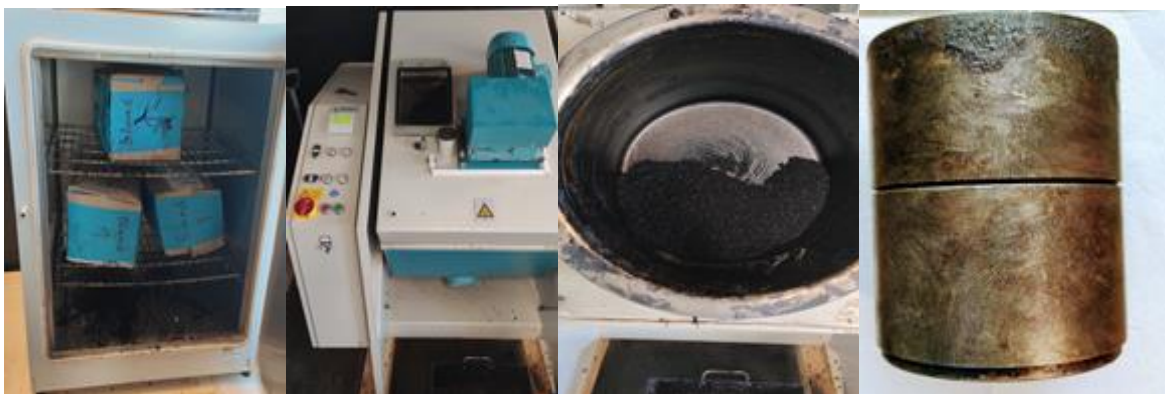
I detta examensarbete tillverkades provkroppar med hjälp av den befintliga utrustningen i LTH:s asfaltslaboratorium enligt Marshallkompakteringsmetoden (EN 12697–30). Laborationsarbetet utgick från de fem ovan beskrivna asfaltsblandningarna, där en ABT8 agerade referens och fyra gummiasfaltsblandningar. Sammanlagt stampades 150 provkroppar vilket betyder att det per blandning tillverkades 30 provkroppar (se Figur 13). En provkropp som packades med målvikten  $1100 \pm 5$  g, och med diametern  $100 \pm 5$  mm resulterade i en höjd av 55 – 104 mm beroende på typ av asfalt.



Figur 13: Mängd provkroppar som tillverkades från en av blandningarna.

#### 4.2.1 Arbetsgång och utförande

Innehåll till alla blandningar har redan beskrivits utförligt i avsnitt 6.1. I detta avsnitt beskrivs arbetsgången och tillverkning av provkroppar. Varje blandning genomfördes och paketerades hos Peab Asfalt AB i kartonger (se Figur 14a). Dessa värmdes därefter upp i värmeskåp med temperaturen 150 °C och värmdes under minst en timme. Därefter blandades asfalten i asfaltsblandare (se Figur 14b) i 120 sekunder följt av ytterligare 360 sekunder med temperaturen 132 °C, i enlighet med blandningsprogrammet. Blandningen genomfördes för att förhindra separation av massan. Efter blandningen fylldes massan i plåtburkar med målvikt 1100±5 g och lades tillbaka i värmeskåpet för att värmas upp till måltemperaturen 150°C på grund av avkylningen under fyllningstiden. Därefter togs cylindern (se Figur 14c) fram och smordes med smörjningsspray så att provkroppen ska kunna tas loss från formen efter kompaktering.

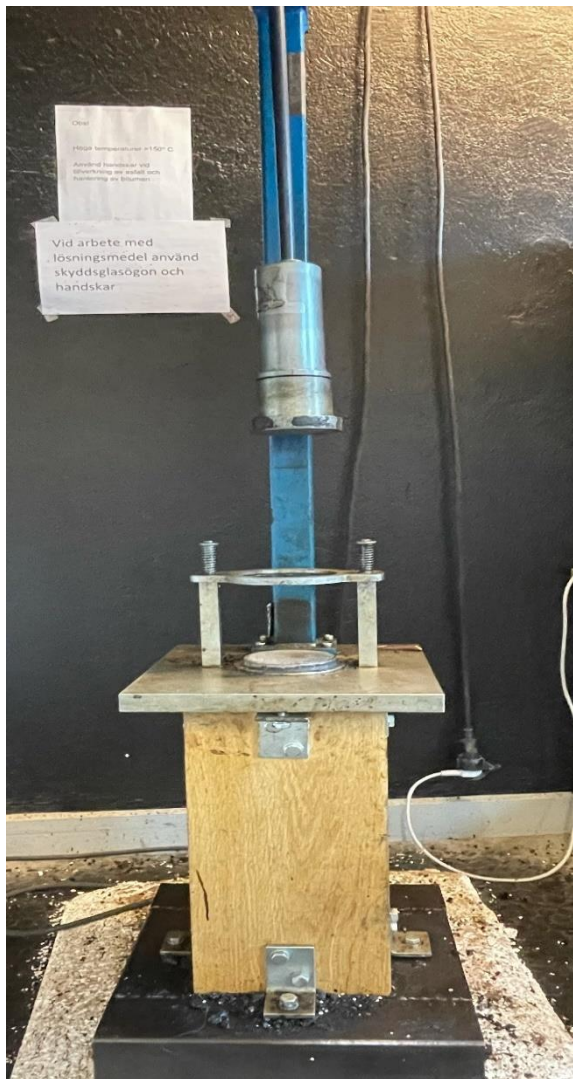


a)

b)

c)

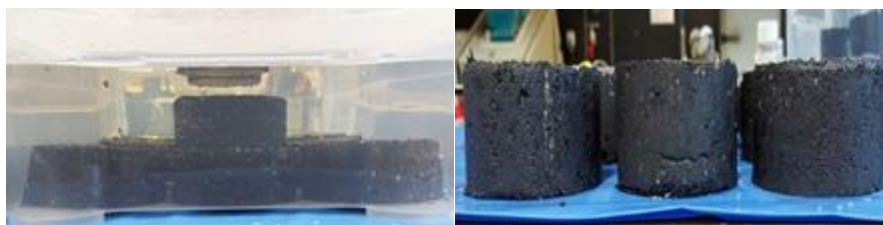
Figur 14. a: Asfaltmassa i kartonglåda. b: Blandare. c: Cylindern för kompaktering av provkroppar.



Sedan hälldes massan i cylindern och placerades i marshallkompakteringsutrustningen (se Figur 15). Innan påbörjandet av kompaktering av provkroppen läggs filterpapper under och ovanpå cylindern för att undvika att asfalten fastnar på ytorna under kompaktering. Erhållna massan stampas 50 slag på var sida under 50 – 70 sekunder. Packningshammaren i Marshallkompakteringsmetoden består av en cylindrisk styrväv av två komponenter, en glidmassa som väger  $4550 \pm 20$  g och en fot som väger  $3960 \pm 20$  g. Efter kompakteringen togs cylindern ur och lades i luft (rumstemperatur) i minst 30 minuter för att svalna innan att provkroppen pressas ut ur cylindern, detta för att förhindra att provkroppen deformeras vid utpressningen.

Figur 15: Marshallkompakteringsutrustning i asfaltlaboratoriet vid LTH.

Provkropparna lagrades därefter i luft respektive vatten (se Figur 16) och Marshallstabilitetstest genomfördes efter 1 dygn, 7 dygn och 14 dygn med syfte att undersöka eventuell skillnad i stabilitet och hållfasthet utifrån lagringsförhållanden och tid.



Figur 16: Luft respektive vattenlagring för asfaltprovkropparna.

### 4.3 Beräkning av hålrums halt

Hålrums halt definieras i asfaltbetong som utrymmet (luft och lättflyktiga ämnen) mellan stenarna och bindemedlet (Parhamifar och Agardh, 2014). Detta har stor betydelse då en hög hålrums halt medför låg stabilitet, ökat slitage genom stensläpp och ökad deformationsbenägenhet, medan med en låg hålrums halt medför risk för blödning, låg friktion, mörk yta och risk för plastiska deformationer. Enligt Trafikverkets krav för bitumenbundna lager skall hålrums halten för tät asfaltbetong (ABT 8) vara  $3,5 \pm 1$  vol-%. Beräkning av hålrums halten sker via att bestämma skrymdensiteten för provkroppen samt kompaktensiteten för stenmaterial och gummi. Hålrums halten beräknas enligt följande samband:

$$H = 100 * \frac{(A - B)}{A}$$

H=Hålrums halt, i volymprocent (vol.-%);

A=Kompaktensitet, i gram per kubikmeter (g/cm<sup>3</sup>);

B=Skrymdensitet, i gram per kubikmeter (g/cm<sup>3</sup>).

I detta fall beräknades hålrums halten enbart för de luftlagrade provkropparna, då bestämmandet av skrymdensitet (se nedan) i de flesta fall förutsätter en torr provkropp.

#### 4.3.1 Skrymdensitet

Skrymdensiteten anger provkroppens täthet inklusive ingående hålrum (Parhamifar, 2019). Enligt svenska institutet för standarder (SS-EN 12697-6:2020) finns fyra olika metoder för att beräkna skrymdensiteten, genom följande provmetoder: torr vägning, SSD -vägning (mättad torr yta), skjutmåttmätning och försegling.

I arbetet undersöktes tre olika standardmetoder för beräkning av skrymdensiteten vilket i samtliga metoder kräver att provkroppen vägs i luft (torrvikt), därefter läggs och vägs i vattenbad (prov vikt i vatten) (se Figur 17), och vattenmättad vikt i luft vilket betyder att prov vikt efter det tas ur vattenbadet. De tre olika metoderna har beskrivits med hjälp av ekvationerna nedan:

Metod 1. (Torrmetoden):

$$B = \frac{m_{t,p}}{m_{t,p} - m_{v,p}} * \gamma_w$$

Där:

B = Provets skrymdensitet, uttryckt i gram per kubikcentimeter (g/cm<sup>3</sup>);

m = provets vikt i gram (g), där t,p står för provets torrvikt i luft och v,p står för provets våtvikt i vatten.



$m_{t,p}$  = Provets vikt, torr i luft för provkropp, uttryckt i gram (g);  
 $m_{v,p}$  = Provets vikt, våt i vatten för provkropp, uttryckt i gram (g);  
 $\gamma_w$  = Vattnets densitet, uttryckt i gram per kubikmeter ( $\text{g/cm}^3$ ).

Metod 2. SSD (mättad torr yta):

$$B = \frac{m_{t,p}}{m_{v,l,p} - m_{v,p}} * \gamma_w$$

Där:

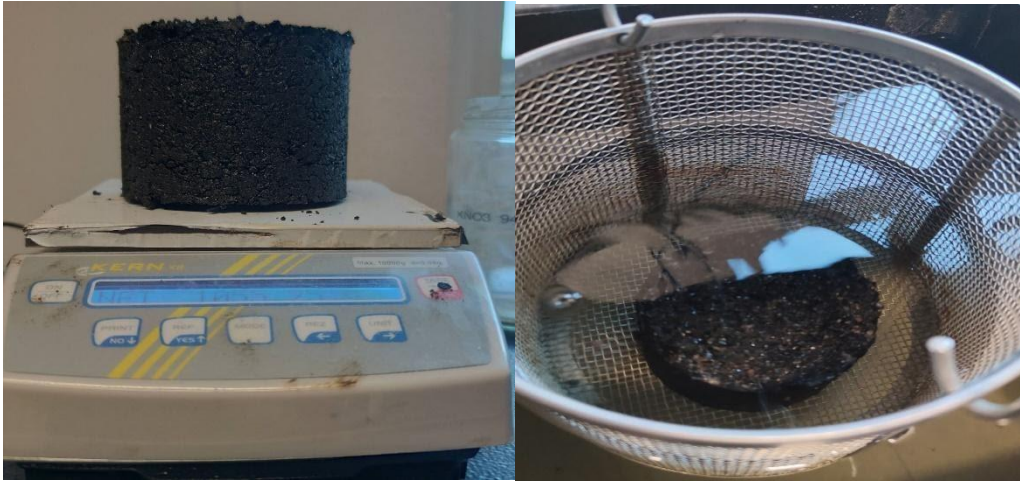
$B$  = Provets skrymdensitet, i gram per kubikcentimeter ( $\text{g/cm}^3$ );  
 $m$  = provets vikt i gram (g), där  $t,p$  står för provets torrsvikt i luft och  $v,p$  står för provets våtsvikt i vatten och  $m_{v,l,p}$  står för provets våtsvikt i luft. vikt.  
 $m_{t,p}$  = Provets vikt, torr i luft för provkropp, uttryckt i gram (g);  
 $m_{v,p}$  = Provets vikt, våt i vatten för provkropp, uttryckt i gram (g);  
 $m_{v,l,p}$  = Provets vikt, våt i luft för provkropp, uttryckt i gram (g);  
 $\gamma_w$  = Vattnets densitet, uttryckt i gram per kubikmeter ( $\text{g/cm}^3$ ).

Metod 3. (Skjutmåttmetoden):

$$B = \frac{m_{t,p}}{\frac{\pi}{4} * h * d^2} * 10^3$$

Där:

$B$  = Provets skrymdensitet, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g/cm}^3$ );  
 $m$  = provets vikt i gram (g), där  $t,p$  står för provets torrsvikt i luft för provkropp,  
 $m_{t,p}$  = Provets vikt, torr i luft för provkropp, uttryckt i gram (g);  
 $h$  = Provets tjocklek, uttryckt i millimeter (mm);  
 $d$  = Provets diameter, uttryckt i millimeter (mm);



Figur 17: Vägande av asfalt kroppen luft- och vattenförhållanden.

### 4.3.2 Kompaktdensitet

Kompaktdensitet anger provkroppens täthet utan hålrummen (Parhamifar, 2019). För att beräkna kompaktdensitet för en asfaltmassa bör blandningsförhållandet mellan bindemedelstyp och stenmaterialet vara kända och kan beräknas enligt följande samband:

$$KS = \frac{m_{t,s} \cdot \gamma_w}{m_{t,s} - m_{v,s}}$$

Där:

KS = Stenmaterialets kompaktdensitet, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

m = provets vikt i gram (g), där t,s står för provets torr vikt i luft för stenmaterial, v,s står för provets vik i vatten för stenmaterial.

$m_{t,s}$  = Provets vikt, torr i luft för stenmaterialet, uttryckt i gram (g).

$m_{v,s}$  = Provets vikt i vatten för stenmaterialet, uttryckt i gram (g);

$\gamma_w$  = Vattens densitet, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$$A = \frac{1}{\left(\frac{P_b}{D_b} + \frac{P_s}{KS}\right)}$$

Där:

A = Kompaktdensitet, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

KS = Stenmaterialets kompaktdensitet, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$P_b$  = Procent bindemedel, uttryckt i (%);

$D_b$  = Densitet för bindemedel, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$P_s$  = Procent stenmaterial, uttryckt i (%).

För referensblandningen ABT8 blev beräkningen:

$$A = \frac{1}{\left(\frac{0,0065}{1,022} + \frac{0,935}{2,67}\right)} = 2,42 \text{ g/cm}^3$$

Vid beräkning av kompaktdensitet för gummiprovkroppar var det svårt att ta reda på relationen och interaktionen som sker mellan gummit och bitumenet, på grund av att gummit är poröst och bitumenet fyller porerna (RISE 2018). Med andra ord absorberar gummit bitumen och andelen av bitumen som behåller sin volym är okänd, samtidigt som det är okänt hur gummits volym påverkas. Vid undersökning av nya material som är poröst och elastisk eller har en hög andel av nya material, t.ex. gummi i beläggningen, utgår arbetet enligt gällande standard (RISE 2018). Vid beräkning av kompaktdensiteten i arbetet beaktas materialens mängder som användes vid förbehandling av massan. I följande samband framgår alla mängder av inblandade material, men utan hänsyn till kemiska interaktion som sker mellan ingående komponenter:

$$A = \frac{1}{\left(\left(\frac{\text{bitumen}_{rent}\%}{\gamma_{bitumen}}\right) + \left(\frac{\text{Sten}\%}{\gamma_{sten}}\right) + \left(\frac{\text{gummi}\%}{\gamma_{gummi}}\right) + \left(\frac{\text{bitumen}\%}{\gamma_{bitumen}}\right)\right)}$$

Där:

A = kompaktdensitet, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g/cm}^3$ );

Rent bitumen % = Andel av rent bitumen, uttryckt i (%),

$\gamma_{rent \text{ bitumen}}$  = Densitet för bindemedel, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g/cm}^3$ );

Sten % = Andel av sten, uttryckt i (%),

$\gamma_{sten}$  = Densitet för stenmaterial, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g/cm}^3$ );

Gummi % = Andel av gummi, uttryckt i (%),

$\gamma_{gummi}$  = Densitet för gummi, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g/cm}^3$ );

Bitumen % = Andel av bitumen, uttryckt i (%),

$\gamma_{bitumen}$  = Densitet för bindemedel, uttryckt i gram per kubikcentimeter ( $\text{g/cm}^3$ );

Beräkningen för blandning 1 och blandning 3 blev enligt följande:

$$A = \frac{1}{\left(\left(\frac{0,0645}{1,022}\right) + \left(\frac{0,8185}{2,67}\right) + \left(\frac{0,1052}{1,160}\right) + \left(\frac{1,1694}{1,022}\right)\right)} = 2,12 \text{ g/cm}^3$$

Beräkningen för blandning 2 och blandning 4 blev enligt följande:

$$A = \frac{1}{\left( \left( \frac{0,0645}{1,022} \right) + \left( \frac{0,7016}{2,67} \right) + \left( \frac{0,2105}{1,160} \right) + \left( \frac{0,0234}{1,022} \right) \right)} = 1,89 \text{ g/cm}^3$$

#### 4.4 Marahallstabilitetstest

Marshallstabilitetstestet är en amerikansk metod som används för att ta reda på hållfastheten hos asfaltprovkroppar. Metoden tillämpas genom att provkroppen läggs i vattenbad (60°C) i 30 minuter, sedan pressas den mellan två ok med konstant belastningshastighet (se. Figur 18) (Hultqvist, 1993). Belastningen som orsakar brottet i massan betecknas som "Stabilitetsvärdet" (R) och den motsvarande vertikala deformationen definieras "flytvärdet" (G) som enligt EN 12697 - 34:2020 kan hållfastheten/styvheten (S) beräknas enligt:

$$S = \frac{R}{G}$$

Där:

S=Styvhet, uttryckt i newton per millimeter, (N/mm);

R=Stabilitet, uttryckt i kilonewton (kN);

G=Töjning, uttryckt i millimeter (mm).



Figur 18: Marahallstabilitetstestutrustning.

## 4.5 Observationer och anmärkningar under genomförande

### 4.5.1 Observationer och anmärkningar under tillverkningen av provkroppar

Gällande referensen, ABT8, har det inte upptäckts någon märklig iakttagelse under framställning av provkroppar. Ett antal iakttagelser har gjorts vid framställning av provkroppar från blandning 1 och blandning 3 i vilka 25% av ballast ersattes med gummi vid olika tider efter förbehandlingen (direkt och efter 24). Först och främst luktade asfaltmassorna med gummi annorlunda och tog mer volymen av cylindern p.g.a. gummit, för att få motsvarande målvikt. En tänkbar anledning kan vara att gummi med partikelstorlek 2–6 mm blandas in i asfaltmassan som ersättning av 12,5% av ballasten med partikelstorlek 0–4 mm. Det kändes dämpande under kompaktering, och det är troligt att den fjädrande egenskapen som gummit har är orsak till detta. Båda blandningarna hade sämre vidhäftningsegenskaper vilket innebär att komponenter i massan inte var bindande, men blandning 3 (24h efter) verkade vara lite mer klibbig än blandning 1. En tänkbar anledning kan vara att gummit skulle absorbera bitumen under 24 timmar. Vid framställning av nämnda provkroppar lossnade partiklar vilket innebar förluster vid kompakteringen och var det svårt att vända provcylindern för packning på andra sidan, vilken behövde göras med stor försiktighet. För blandning 2 och 4 märktes det en tydlig lukt och rök när blandningarna värmdes upp till 150 °C i värmeskåpet. De framställda provkropparna hade bättre stabilitet och var tjockare jämfört med massan med 25% gummi.

### 4.5.2 Observationer och anmärkningar under Marshallstabilitetstest, beräkning av skrymdensitet och sektionmätning

Observationerna och anmärkningarna för de olika gummiblandningarna presenteras med att tänka på lagringsförhållandena, efter de olika tiderna för provning och för de gummiblandningarna i följande tabeller.

Tabell 8. Samlade observationer och anmärkningar för de olika gummibeläggningarna baserat på lagringstiden efter kompaktering, lagringsförhållandet (torrt eller vått) samt gummiblandning från blandning 1.

Tid efter kompaktering	Torr	Våt
1 Dygn	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kropparna behåller inte sin form efter Marshall test jämfört med referensen (ABT8).</li><li>• Vid vägning i vatten rinner en hel del vatten</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kroppar rinner inte så mycket vatten ur dem jämfört med luftlagrad.</li><li>• Lossnande av material sker i olika läge som upptagning ur</li></ul>

	<p>ur kroppar, vilket kanske strävar efter en annan metod enligt standard som skrymdensitet ska beräknas baserad på dimension (diameter och tjocklek).</p>	<p>vattenbad, vid vägningen eller under torkningen av kropparna efter vattenbad med 60 °C.</p>
7 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torr form behåller inte sin form efter test som referensen (ABT8).</li> <li>• Vid mätning av sektioner verkar kropparna mer skör, tappar sjök, massa av material vid beröring.</li> <li>• Lossnar sten gummi vid upptag från vattenbad, både från och till vatten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rinner inte så mycket vatten efter vattenbadet.</li> <li>• Svårare att få in i Marshalltestutrustningen.</li> <li>• Ändring i geometrisk form vid botten.</li> <li>• Efter vattenbad, verkar ej rinner så mycket vatten ur dem. Verkar ej fastna något, eller väldigt lite material vid avtorkning(handduk).</li> <li>• Kroppen tänkas ändrat sig geometrisk form (mer i botten) efter 60 °C.</li> <li>• Verkar det svårare att få in i Marshall Test.</li> </ul>
14 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lossnar en del material före vägning och (från till) vattenbad.</li> <li>• Lossnar lite korn material efter uppvärmning.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rinner inte så mycket vatten ur kroppen.</li> <li>• Ytan känns slemmig vid upptog ur vatten</li> <li>• Rinner vatten ur kroppen dock ej så mycket.</li> </ul>

Tabell 9. Samlade observationer och anmärkningar för de olika gummibeläggningarna baserat på lagringstiden efter kompaktering, lagringsförhållandet (torrt eller vått) samt gummiblandning från blandning 3.

Tid efter kompaktering	Torr	Våt
1 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Smular kring kanterna före vägning</li> <li>• Svårare att få in i Marshall test.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kroppar rinner inte så mycket vatten ur dem jämfört med luftlagrad.</li> <li>• Lossnande av material sker i olika läge som upptagning ur vattenbad</li> </ul>
7 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Svårare att få in i Marshall test.</li> <li>• Smular kring kanterna före vägning</li> <li>• Rinner en del vatten vid upptag från våt vägning.</li> <li>• Fast ej lika mycket som tidigare gummikroppar.</li> <li>• Efter varmvattenbad lossnar i princip inget material, beror detta på att det lossnade vid vägning eller på grund av värmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vid upptag ur vattenlagring vissa smular mer andra.</li> <li>• Vissa mindre än motsvarande torra, visa mer.</li> <li>• Ingen slemmig känsla på ytan.</li> </ul>
14 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lossnar en del material före vägning och (från till) vattenbad.</li> <li>• Lossnar lite korn material efter uppvärmning.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rinner inte så mycket vatten ur kroppen.</li> <li>• Ytan känns slemmig vid upptog ur vatten</li> </ul>

Tabell 10. Samlade observationer och anmärkningar för de olika gummibeläggningarna baserat på lagringstiden efter kompaktering, lagringsförhållandet (torrt eller vått) samt gummiblandning från blandning 2.

Tid efter kompaktering	Torr	Våt
1 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindre materiallossning jämfört med våt lagrade.</li> <li>• Mycket vatten som rinner ur kroppen.</li> <li>• Efter Marshall, smulas lätt sönder (mindre kraft än att bryta blyertspenna).</li> <li>• Lossnar sten gummi vid upptag från vattenbad, både från och till vatten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hade materiallossning vid upptagning ur vattenförvaring.</li> <li>• Vid temperatur 60°C av vattenbad, började smulas sönder delvis.</li> </ul>
7 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lossnar löst material före vattenbads uppvärmning (relativt smular)</li> <li>• Kropp känns slemmig i någon grad efter upptag ur vattenbad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Svårare att få in i pressen då kroppen ändrade sin form.</li> <li>• Lossnar material vid upptag ur vattenbad.</li> <li>• Lossnar lite låst material före vattenbaduppvärmning dock verkar det mindre (rätt så mycket mindre) än torr.</li> </ul>
14 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mycket material lossnar före vattenbadet (relativt sker vid kanterna, topp-, och bottenytor.</li> <li>• Kan med lätthet ta bort enskilda stenar från kanter och topp/botten ytor.</li> <li>• Rinner vatten ur kroppen efter vågar av kroppen torr.</li> <li>• Lossnar material mycket lätt efter uppvärmning.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mer slemmig yta vid upptag vattenbad.</li> <li>• Svårare att ta bort material från ytan.</li> <li>• Undantaget botten kanten dock kanske svagare vid packning.</li> <li>• Rinner inte så mycket vatten ut kroppen.</li> </ul>



Tabell 11. Samlade observationer och anmärkningar för de olika gummibeläggningarna baserat på lagringstiden efter kompaktering, lagringsförhållandet (torrt eller vått) samt gummiblandning från blandning 4.

Tid efter kompaktering	Torr	Våt
1 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindre materiallossning jämfört med våt lagrade.</li> <li>• Ändring vid geometrisk form, mer från botten</li> <li>• Lossnar enstaka material från kanterna före uppvärmning.</li> <li>• Rinner en del vatten ur kroppen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hade materiallossning vid upptagning ur vattenförvaring.</li> <li>• Lossnar lite material när det tas upp ur sin vattenförvaring.</li> <li>• Verkar lossna mer material efter uppvärmningen än torr lagrad.</li> <li>• Vatten förvarade verkar lite mer sköra vid ytan/kanterna än torr lagrad.</li> </ul>
7 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kropp känns slemmig i någon grad efter upptag ur vattenbad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Svårare att få in i pressen då kroppen ändrade sin form.</li> </ul>
14 Dygn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vid mätning av sektioner lossnar mycket ballast.</li> <li>• Det känns jättemycket mjuk, vilket ändrar form på tryck med finger.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lossnar ballast mer än torra kroppar</li> <li>• Mjukheten är mer än torr förhållande.</li> </ul>

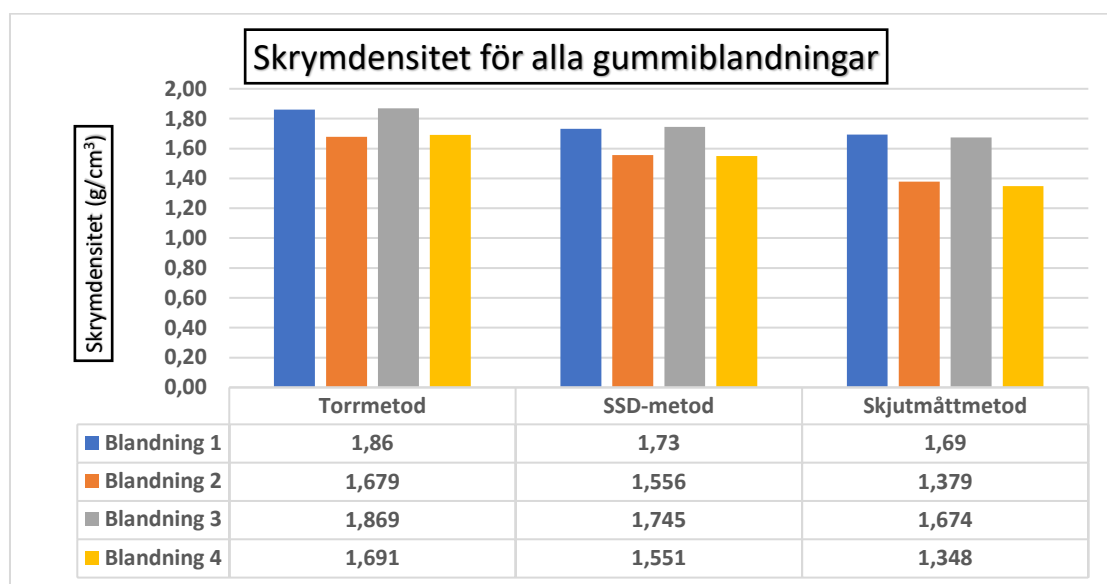
#### 4.5.3 Åtgärder under tillverkning av provkroppar

Några åtgärder har tagits upp under tillverkning av provkroppar och anledning med detta var att utrustningar i laboratoriet ställde in för vanlig asfalt dock i arbetet framställdes asfaltkroppar som innehållit av gummi och behövdes göra små justeringar vid utrustningar såsom stamp där den höjdes och anpassades för gummiprovkroppar samt mer försiktighet beaktades vid omvandling av cylinder i Marshallkompaktering. Utpressning av provkroppar skedde manuellt för några av dem exempelvis blandning 1 och 3, eftersom det var lättare att göra med handen än med stampen. Väntetid till att gummiinblandning provkroppar svalnas innan utpressning ändrades till cirka 30 min medan det vard 15 min för referens.

## 5 Resultat

### 5.1 Skrymdensitet

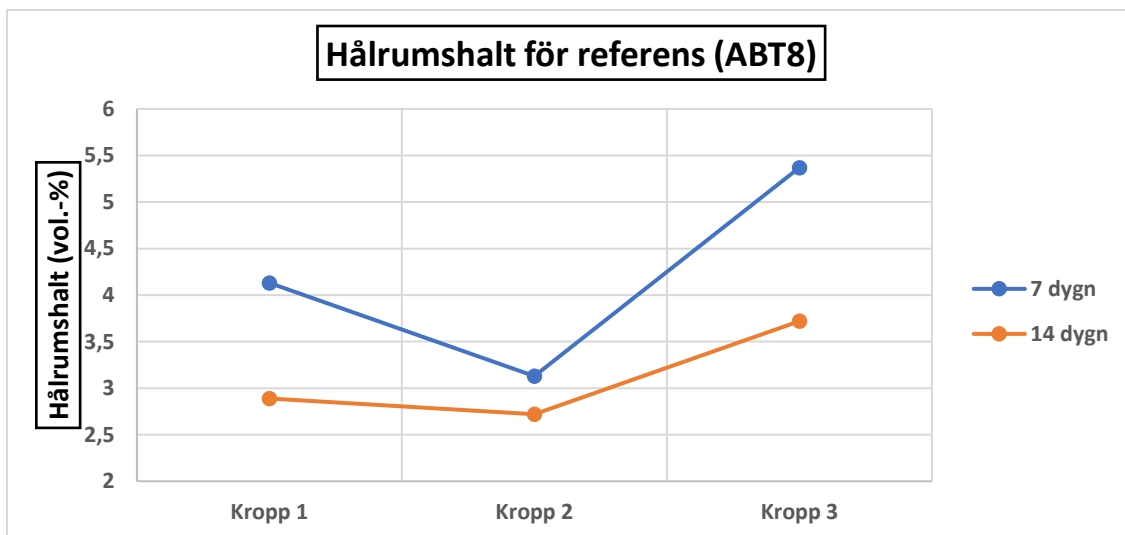
Skrymdensiteten hos samtliga provkroppar har bestämts enligt SS-EN 12697-6:2020 (SIS, 2020), vilken omfattar fyra olika metoder som torrmetoden, SSD (mättad torr yta) och skjutmåttmetod och dessa metoder beskrivs utförligt i avsnitt 6.3.1. Resultatet visar att skrymdensitet enligt metod 1 (torra metoden) är högst, metod 2 kommer i därefter ordning för alla olika provkroppar med olika gummihalt och förbehandlingstyp, och slutligen kommer metod 3 (se Figur 19).



Figur 19: Skrymdensitet för olika blandningar med olika metoder. Metod 1 = torrvägning i luft. Metod 2 = SSD. Metod 3 = skjutmåttmetoden, alla mer beskrivna i kapitel 6.3.1.

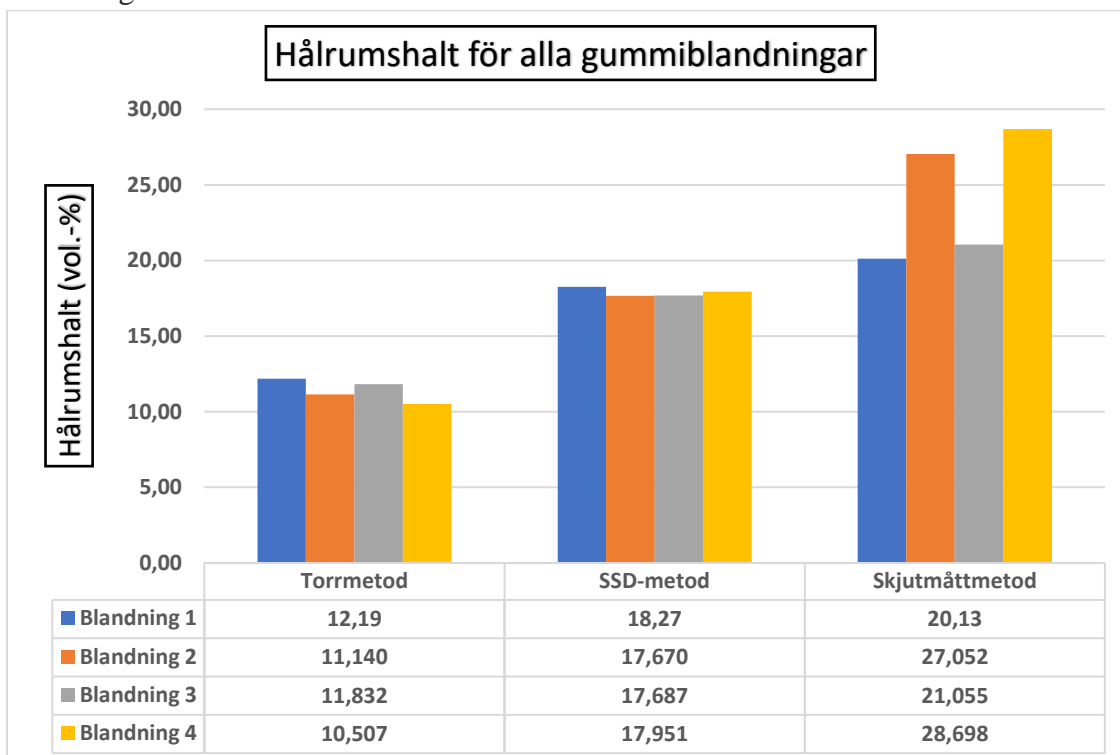
### 5.2 Hålrums halt

I följande figur för referens ABT8 syns att hålrums halt är betydligt mindre jämfört med gummibeläggningarna. Definition av hålrums halt, och vilken inverkan hålrums halten har på beläggningens egenskaper har beskrivits utförligt i avsnitt 6.3.



Figur 20: Hålrums halt för referens (ABT 8) efter olika tider.

Resultatet för hålrums halten för de olika gummibeläggningarna med avseende på skrymdensitet och kompaktdensitet som utfördes i avsnitt 6.3.1 och 6.3.2. visar att hålrums halten enligt skjutmåttmetod är högre jämfört med övriga metoder (se Figur 21). I figuren syns en skillnad för olika beläggningar med olika gummimängder. Med torrmetoden och SSD- metoden (mättad torr yta) skiljer sig hålrums halten inte mycket mellan olika blandningar.



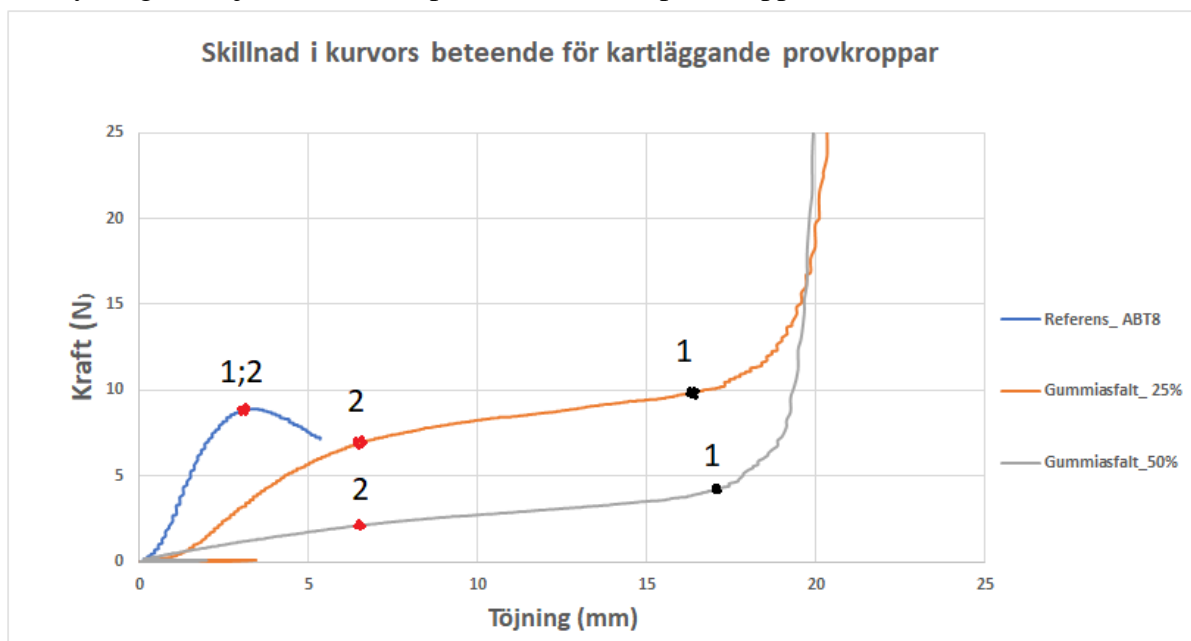
Figur 21: Hålrums halt för gummiasfaltprovkroppar med olika metoder. Där Blandning 1: 25% gummi, 0h. Blandning 2: 50% gummi, 0h. Blandning 3: 25%gummi, 24 h. Blandning 4: 50%, 24h. Där h står för timme (när modifierat gummit blandades med asfalten).

För mer detaljer om skrymdensitet och hållrumshalt enligt torrmetod och skjutmåttmetod för alla provkroppar som testades i Marshallstabilitetstest ser (se Bifoga 2).

### 5.3 Hållfasthet (Styvhet)

För referensbeläggningen ABT 8 som testas med syftet att ta reda på hållfastheten ser den resulterade kurvan ut enligt följande blåa kurvan (se Figur 22), medan gummibeläggningarna med olika andelar gummi (25% respektive 50%) visade ett annat beteende. Trots detta har resultatet av testerna analyserats med en föreslagen vidareutvecklad metod.

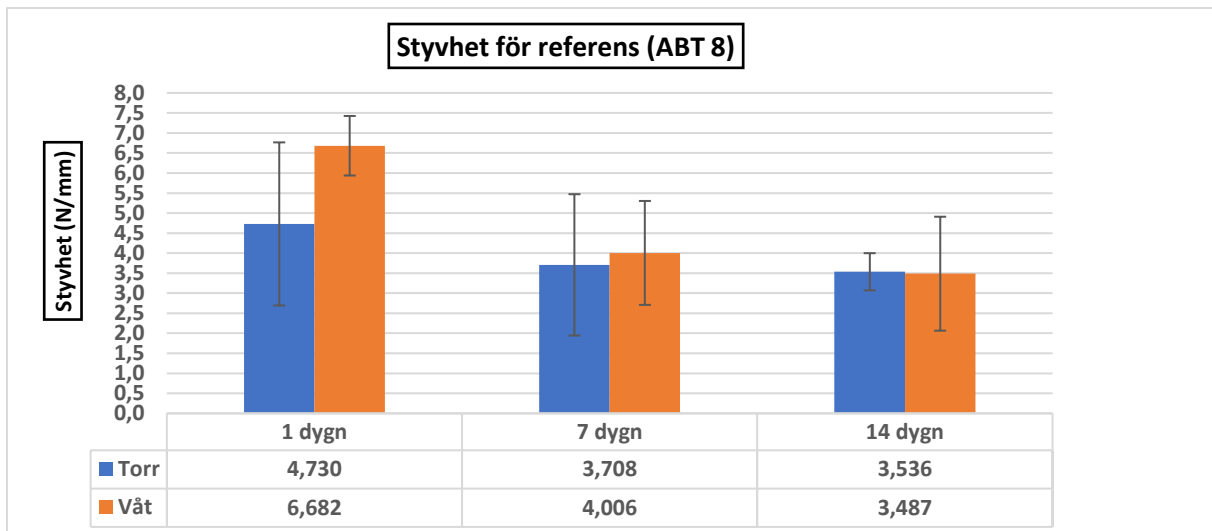
Beräkningen av hållfastheten för gummiprovkropparna utfördes i två kritiska punkter (se Figur 22). Den första punkten (1) är placerad i kurvan precis före att kurvan stiger uppåt d.v.s. den högsta lasten provkroppen klarar (i detta fall när de två oken går ihop) och den simulerar standarden utifrån högsta lasten och förändringen i kurvans beteende. Den andra kritiska punkten (punkt 2) är precis innan att kurvan blir linjär och denna simulerar standarden utifrån kurvans utseende vid högsta last. Punkt 2 tas upp som en kritisk punkt då det kan tänkas att nedbrytningen börjar mellan komponenterna inne i provkroppen.



Figur 22: Skillnad i kurvors beteende och form för olika blandningar vid Marshalltestning.

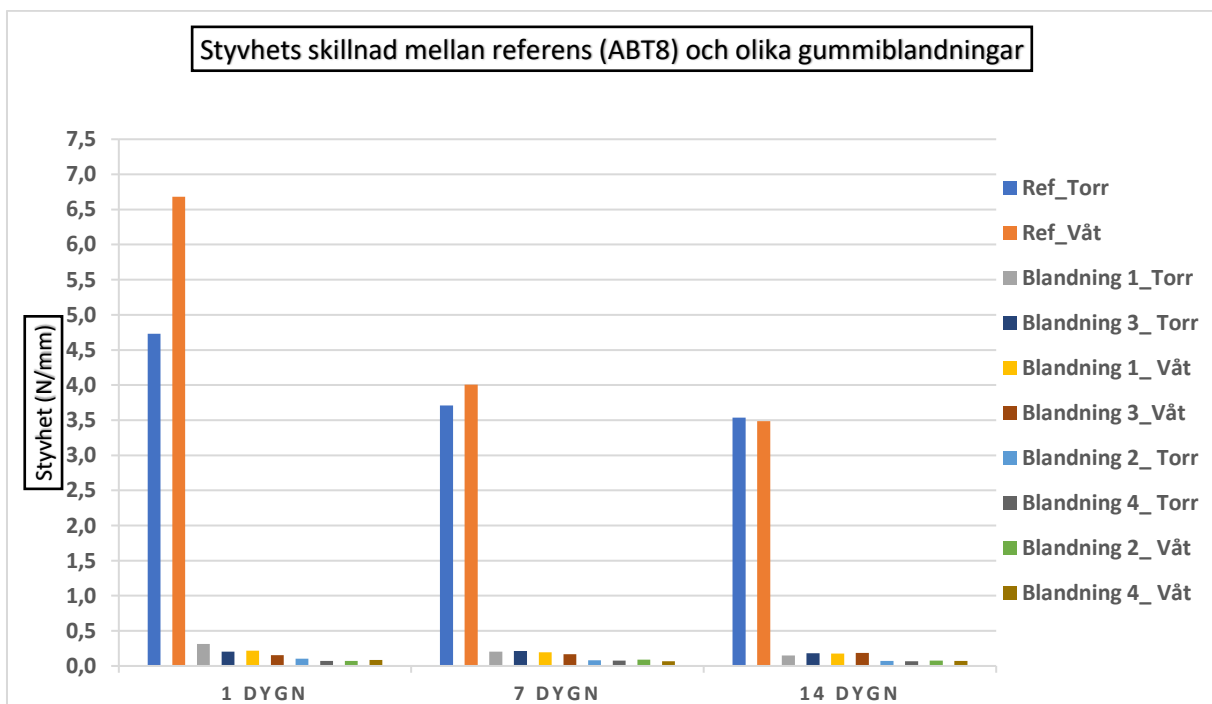
**Punkt 1:** Simulerar standarden vid högsta lasten. **Punkt 2:** Simulerar standarden utifrån kurvans utseende vid högsta lasten.

Resultatet för referensbeläggningen, ABT8 som beräknats enligt gällande standard, visar att styvheten minskar med tiden hos provkroppen, medan det är svårt att avgöra om det finns skillnad med avseende på lagringsförhållande d.v.s. torr och våt, eftersom standardavvikelsen varierar mycket (se Figur 23).



Figur 23: Den uppmätta och beräknade styvheten hos referensen (ABT8). Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

Mätningarna och beräkningarna visar även att styvheten hos gummibeläggningarna är betydligt lägre jämfört med den vanliga referensbeläggningen (se Figur 24). Torr och våt indikerar lagringsförhållande innan utförande av Marshallsstabilitetstest.

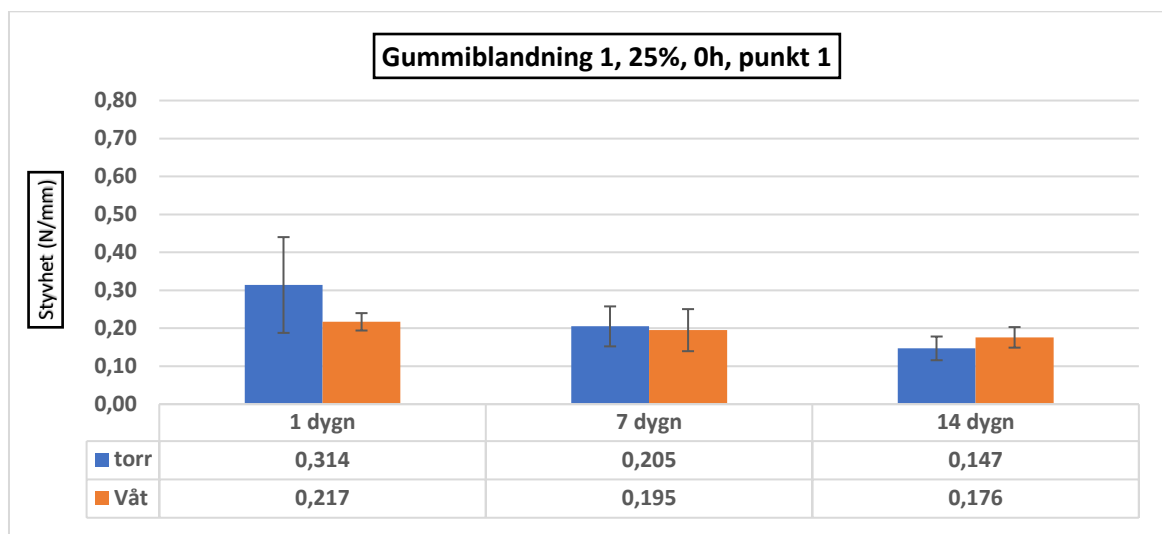


Figur 24: Skillnad i styvheter mellan olika blandningar. Referens: ABT 8. Blandning 1: 25% gummi, 0h. Blandning 2: 50% gummi, 0h. Blandning 3: 25%gummi, 24 h. Blandning 4: 50%, 24h. Där h står för timme (när modifierat gummit blandades med asfalten).

### 5.3.1 Hållfastheten beräknat utifrån punkt 1 (simulera standarden vid högsta lasten)

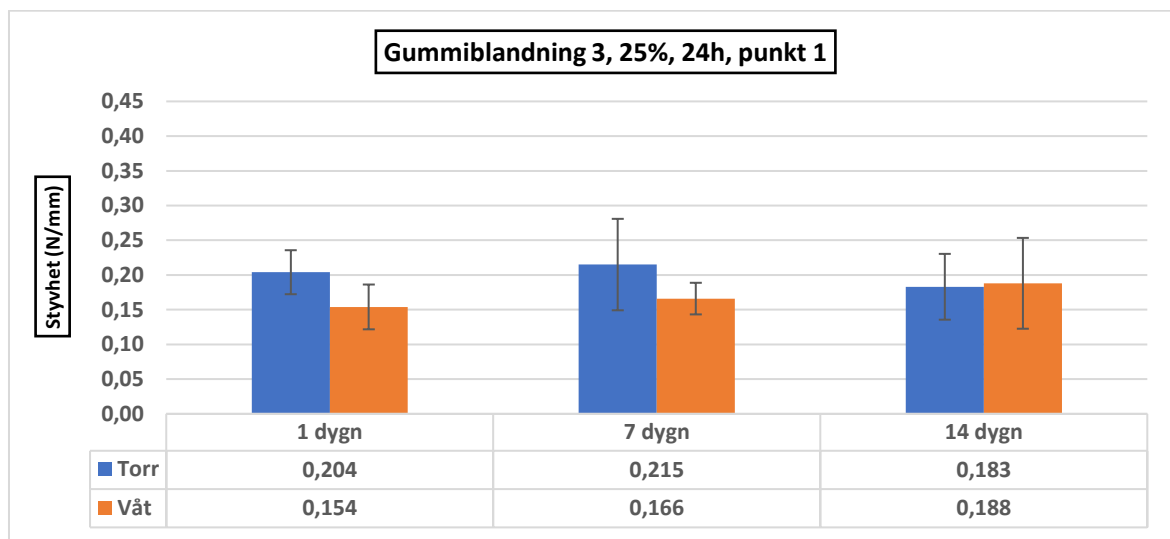
Enligt resultaten för styvhetsberäkningarna för blandning 1 respektive 3 (gummibeläggningen med 25% gummi) skulle det påstås att styvheten i blandning 1 med direkt inblandning av 25%

gummi vid punkt 1 minskar över tiden (se. Figur 25) däremot om det undersöks närmare på lagringsförhållande, överlappar standardavvikelserna så är det svårt att avgöra om det är en faktisk skillnad eller bara stora variationer.



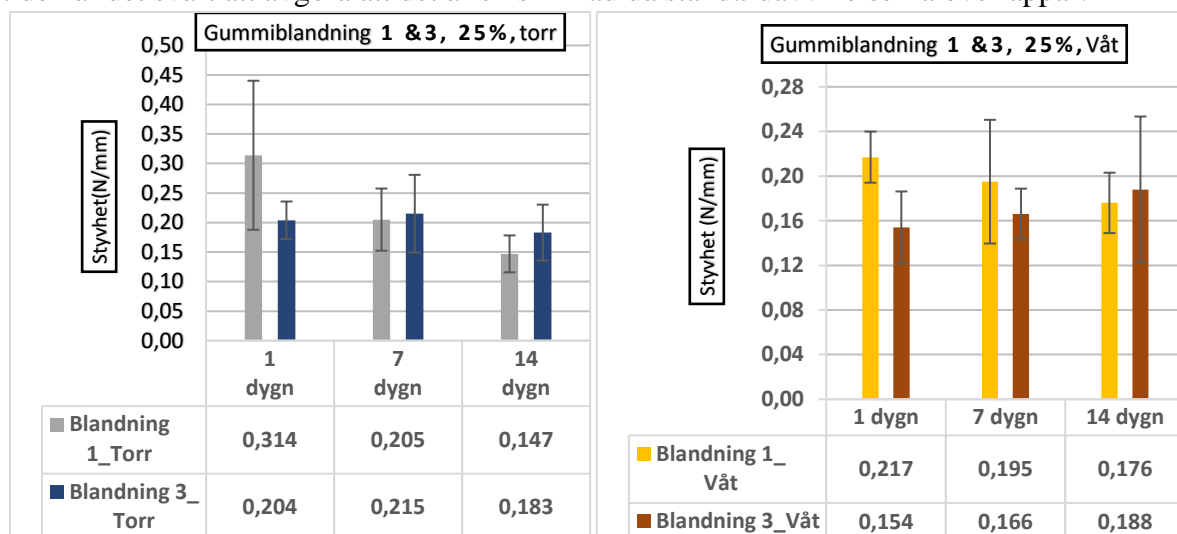
Figur 25: Styvheten hos provkroppar med direkt inblandning av 25% gummi beräknade utifrån punkt 1, definierad enligt FIGUR 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

För blandning 3 med 24h inblandning av 25% gummi vid punkt 1 (Se. Figur 26) syns att standardavvikelserna överlappar både med avseende på lagringsförhållande och styvhet, så är det svårt att avgöra om det är en faktisk skillnad eller bara stora variationer.



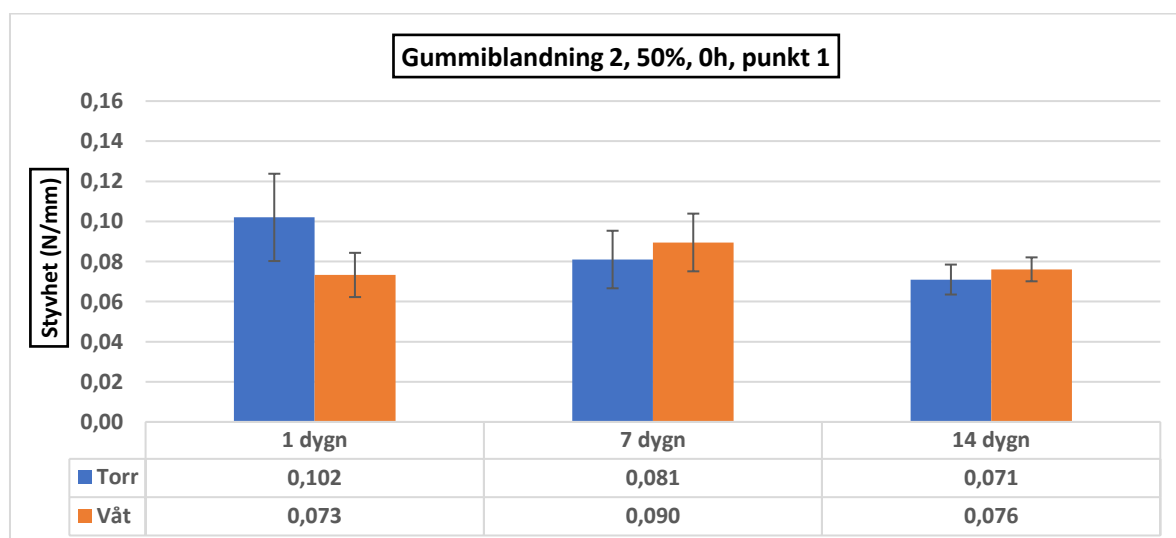
Figur 26: Styvheten hos provkroppar efter 24 timmar inblandning av 25% gummi, punkt 1, definierad enligt FIGUR 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

När provkropparna av blandning 1 och 3 med inblandning av 25% gummi (se Figur 27) jämförs, syns att torrlagring provkroppar har högre styvheten än våt lagring dock baserad på tiden är det svårt att avgöra att det är en skillnad då standardavvikelserna överlappar.



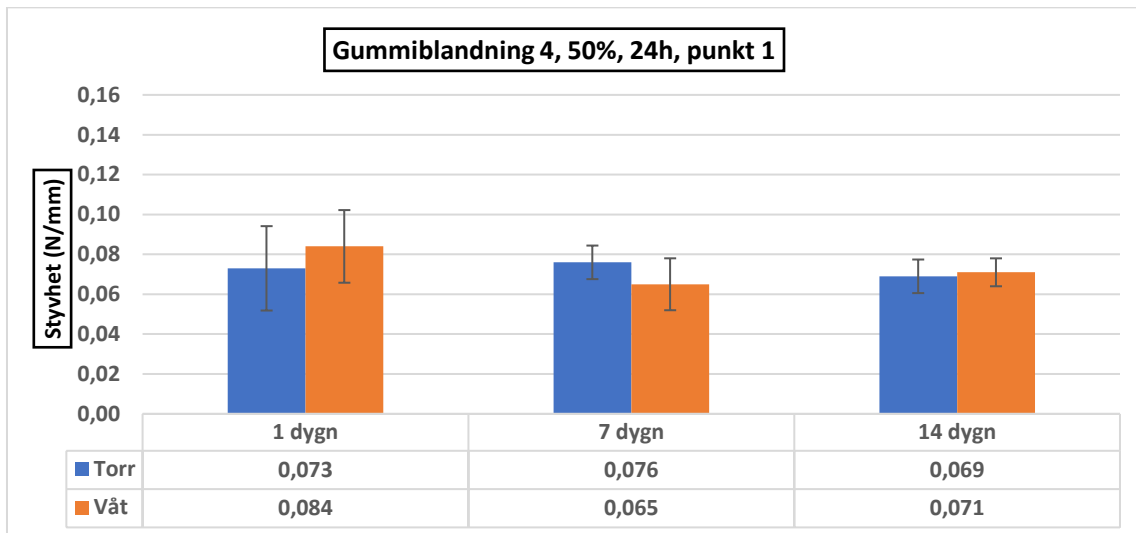
Figur 27: Jämförelse mellan blandning 1 och blandning 3 d.v.s. med samma mängd av gummi (25%) men med skillnad i tid gällande blandning med asfalten, beräknat utifrån punkt 1 som definieras i figur 22. Den vänstra figuren visar torrt lagringsförhållande och den högra figuren visar det våta lagringsförhållandet.

Resultatet visar att blandning 2 med direkt inblandning av 50% gummi vid punkt 1 (Se. Figur 28) minskning av styvhet över tiden, medan med avseende på lagringsförhållande överlappar standardavvikelserna, så är det svårt att avgöra exakt om det är en skillnad.



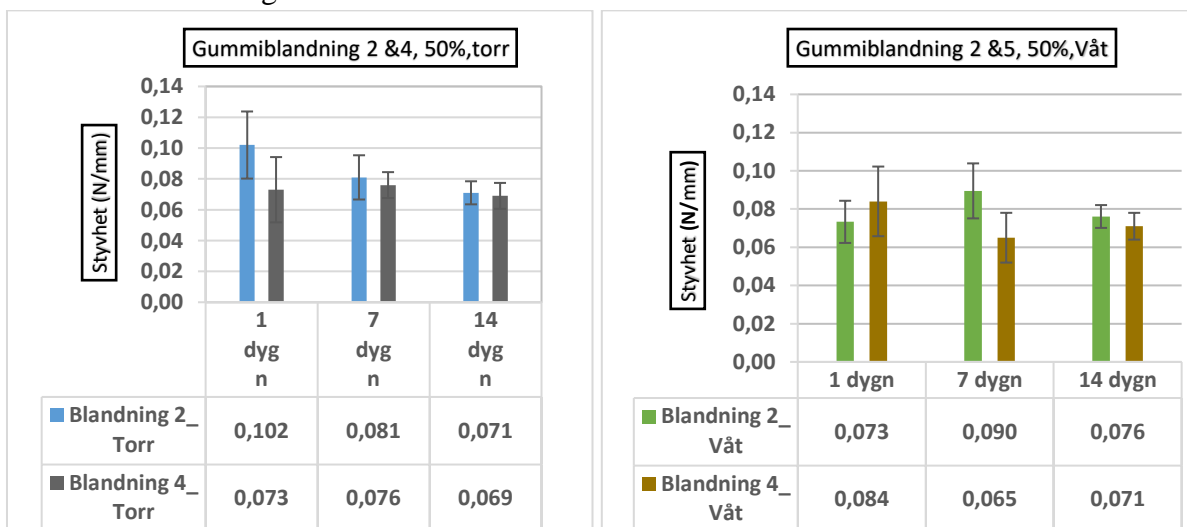
Figur 28: Styvheten hos provkroppar med direkt inblandning av 50% gummi, punkt 1 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

För blandning 4 med 24h inblandning av 50% gummi vid punkt 1 (Se. Figur 29) syns att standardavvikelserna överlappar både med avseende på lagringsförhållande och styvhet, så är det svårt att avgöra om det är en faktisk skillnad eller bara stora variationer.



Figur 29: Styvheten hos provkroppar efter 24 timmar inblandning av 50% gummi, punkt 1 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

När provkropparna av blandning 2 och 4 med inblandning av 25% gummi (se Figur 30) jämförs, syns att standardavvikelserna överlappar i både torrlagring och våt lagring provkropp så är det svårt att avgöra att det är en skillnad.



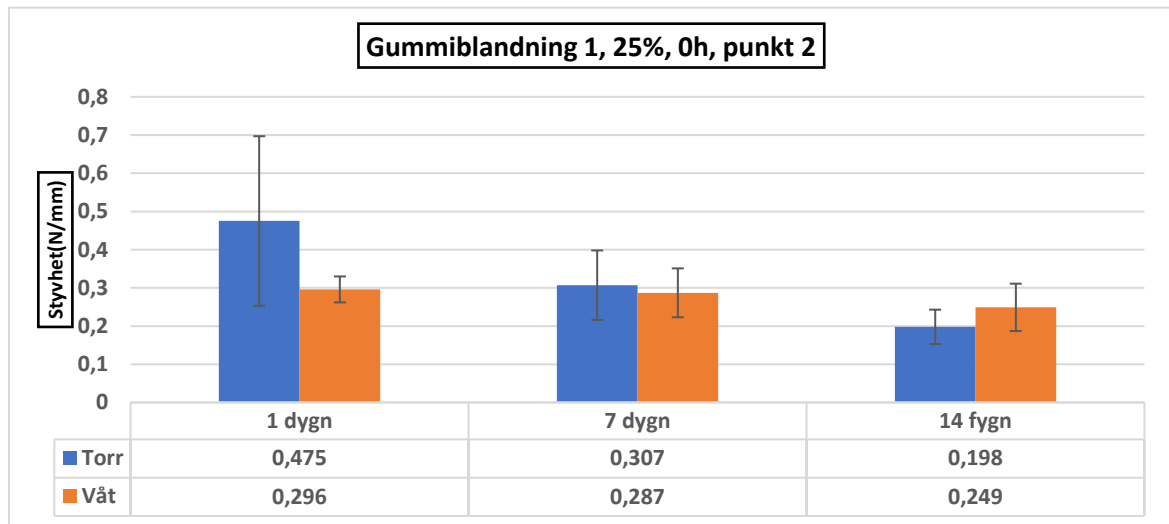
Figur 30: Jämförelse mellan blandningar 2, 4 d.v.s. med samma mängd av gummi (50%) men med skillnad i tid gällande blandning med asfalten, punkt 1 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

### 5.3.2 Hållfastheten beräknad utifrån punkt 2 (simulera standarden utifrån kurvans utseende vid högsta lasten)

Enligt resultaten för styvhetsberäkningarna för blandning 1 respektive 3 (gummibeläggningen med 25% gummi) skulle det påstås att styvheten i blandning 1 med direkt inblandning av 25%

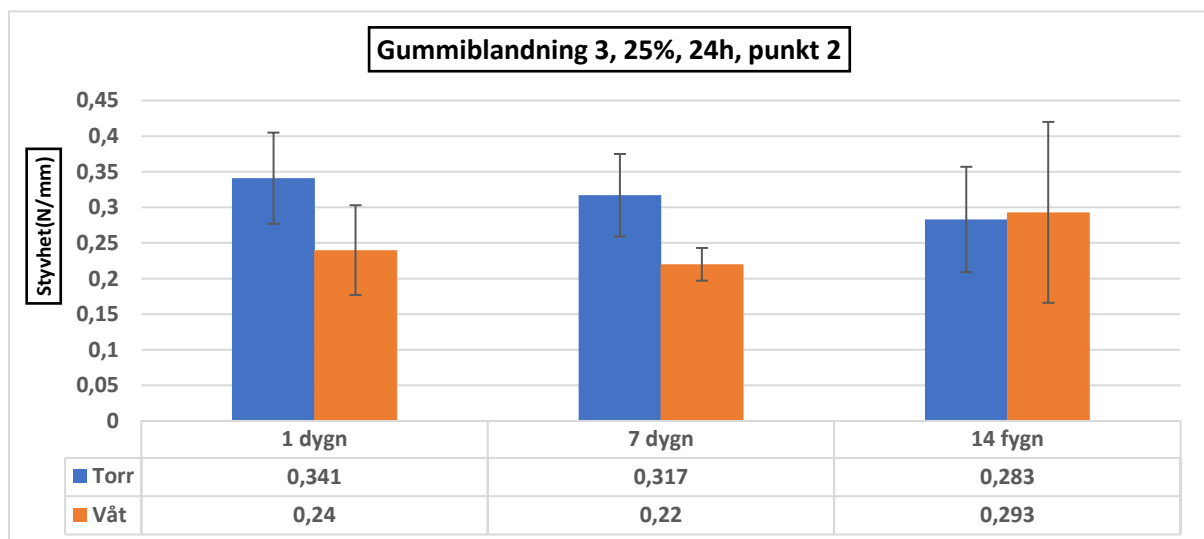


gummi vid punkt 2 minskar över tiden (se. Figur 31) däremot om det undersöks närmare på lagringsförhållande, överlappar standardavvikelsena så är det svårt att avgöra om det är en faktisk skillnad eller bara stora variationer. När dessa förhållanden jämförs med punkt 1 då styvheten är lite högre vid punkt 2 för samtliga (torr och våt) provkroppar.



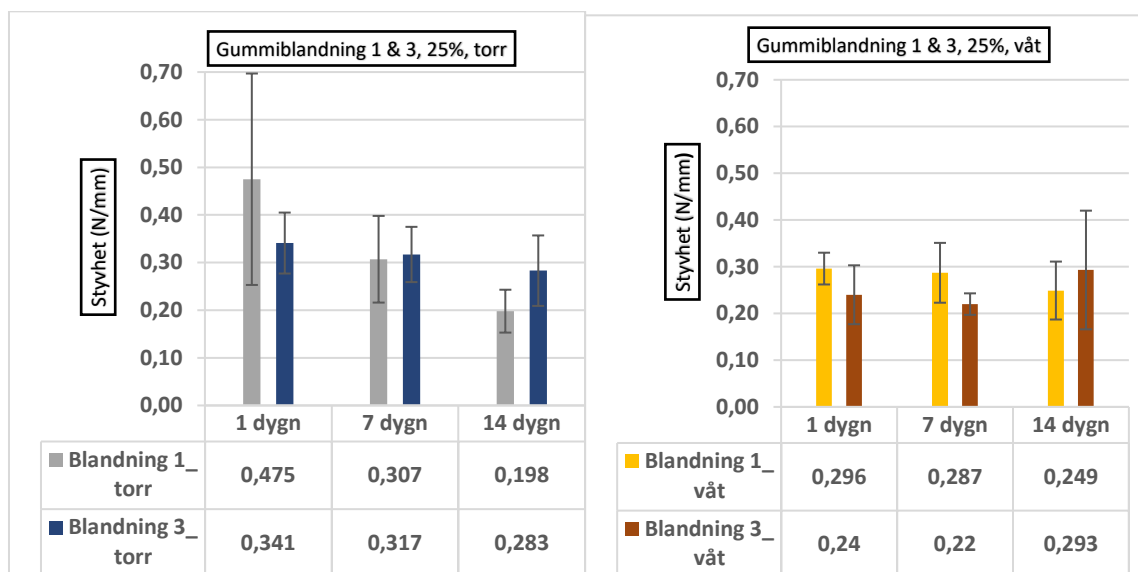
Figur 31: Styvheten hos provkroppar med direkt inblandning av 25% gummi, Punkt 2 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

För blandning 3 med 24h inblandning av 25% gummi vid punkt 2 (Se. Figur 32) syns att standardavvikelsena överlappar både med avseende på lagringsförhållande och styvhet, så är det svårt att avgöra om det är en faktisk skillnad eller bara stora variationer.



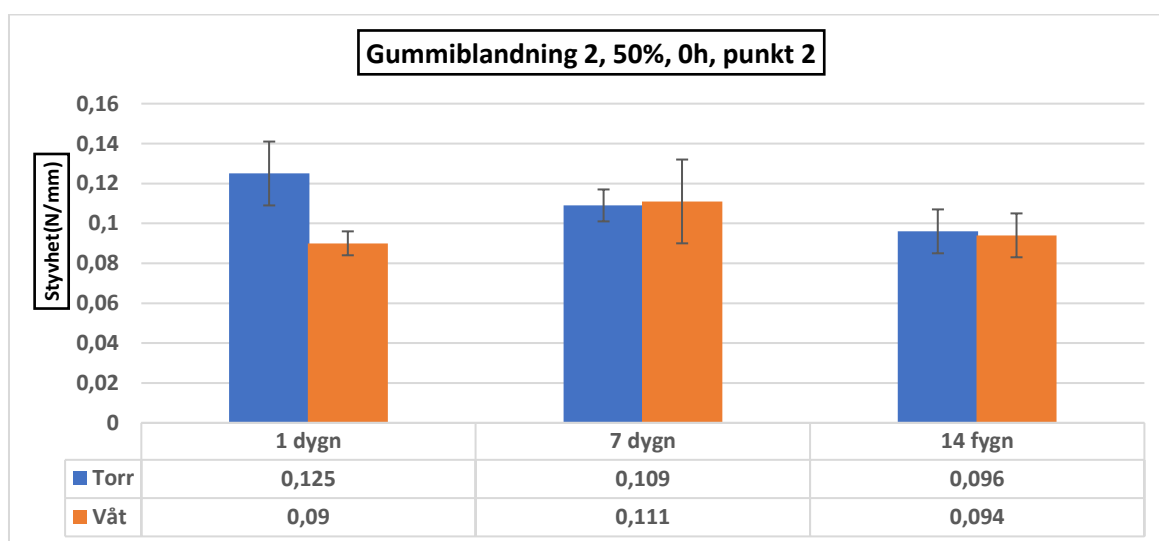
Figur 32: Styvheten hos provkroppar efter 24 timmar inblandning av 25% gummi, punkt 2 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

När provkropparna av blandning 1 och 3 med inblandning av 25% gummi (se Figur 33) jämförs, syns att torrlagring provkroppar har högre styvheten än våt lagring dock baserad på tiden är det svårt att avgöra att det är en skillnad då standardavvikelserna överlappar.



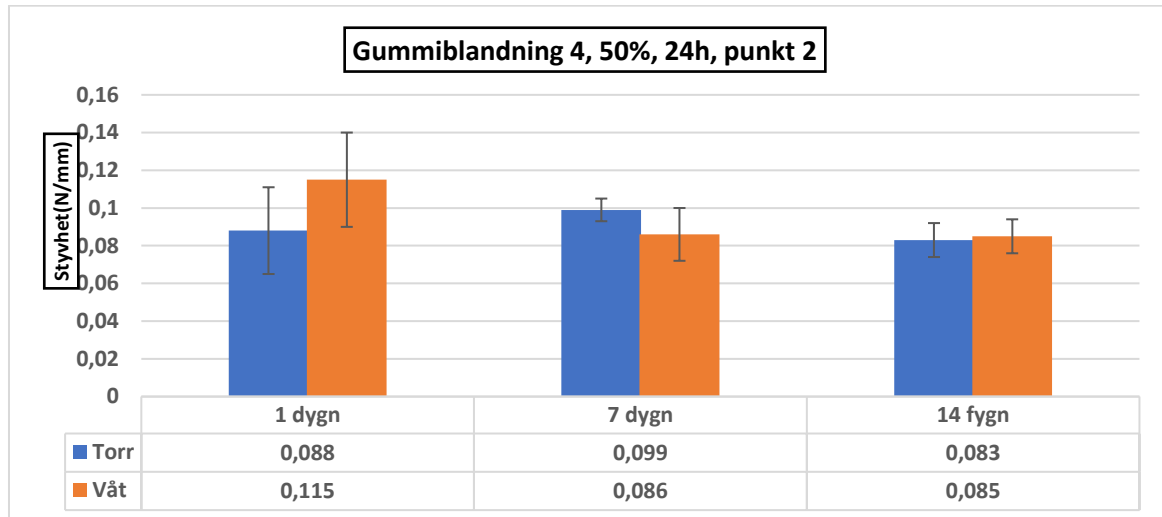
Figur 33: Jämförelse mellan blandningar 1, 3 d.v.s. med samma mängd av gummi (25%) men med skillnad i tid gällande blandning med asfalten, punkt 2 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärden och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

Resultatet visar att blandning 2 med direkt inblandning av 50% gummi vid punkt 2 (Se. Figur 34) att både över tiden och med avseende på lagringsförhållande överlappar standardavvikelserna, så är det svårt att avgöra exakt om det är en skillnad.



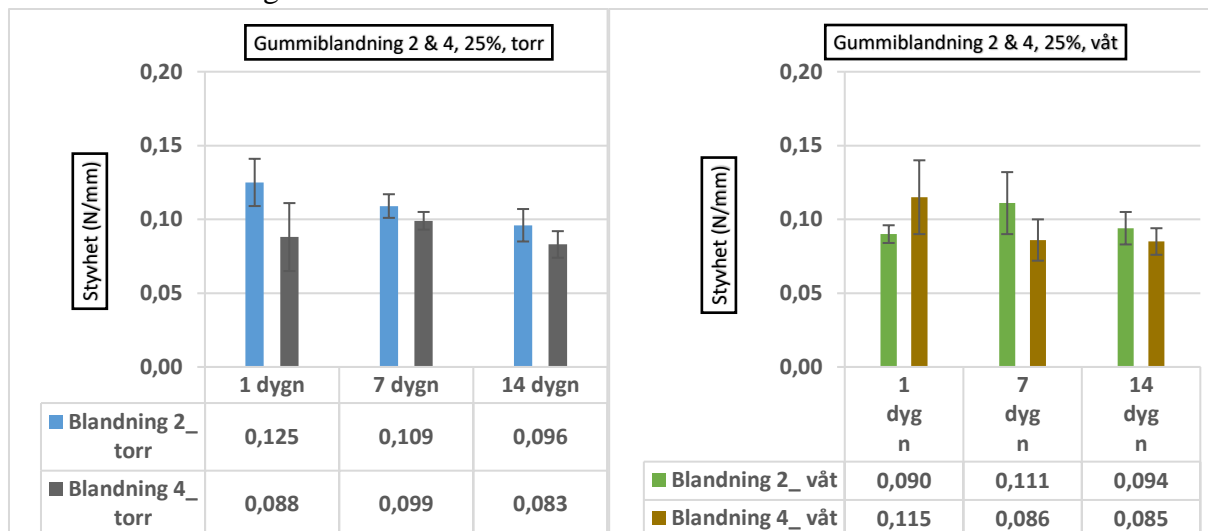
Figur 34: Styvheten hos provkroppar med direkt inblandning av 50% gummi, punkt 2 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärden och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

För blandning 4 med 24h inblandning av 50% gummi vid punkt 2 (Se. Figur 35) syns att standardavvikelserna överlappar både med avseende på lagringsförhållande och styvhet, så är det svårt att avgöra om det är en faktisk skillnad eller bara stora variationer.



Figur 35: Styvheten hos provkroppar efter 24 timmar inblandning av 50% gummi, punkt 2 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

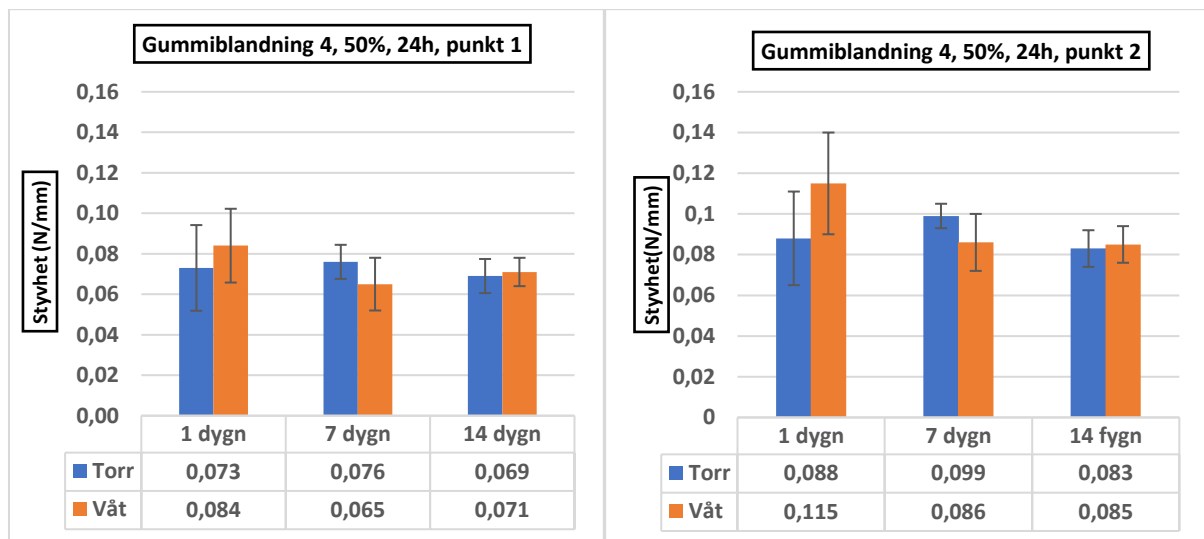
När provkropparna av blandning 2 och 4 med inblandning av 25% gummi (se Figur 30) jämförs, syns att standardavvikelserna överlappar i både torrlagring och våt lagring provkropp så är det svårt att avgöra att det är en skillnad.



Figur 36: Jämförelse mellan blandning 2, 4 d.v.s. med samma mängd av gummi (50%) men med skillnad i tid gällande blandning med asfalten, punkt 2 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

### 5.3.3 Skillnad i hållfasthet utifrån de två beräkningspunkterna

Styvheten för de olika gummiblandningarna visar en liknande beteende i de två olika punkterna (punkt 1 och 2). Exempelvis, vid jämförelse av punkterna för blandningar 4 med inblandning av 50% gummi med väntan 24h efter förbehandlingen av gummit, syns det tydligt att styvheten visar en liknande variation gällande både lagringstid och lagringsförhållande (se Figur 37). Övriga jämförelse mellan olika gummiblandningarna finns i bilaga 6.



Figur 37: Jämförelse för blandning 4 i de olika studerande punkter 1 respektive 2 som definieras i figur 22. Staplarna visar medelvärdet och felstaplarna är den beräknade standardavvikelsen. Dessa är beräknade utifrån tre provkroppar.

## 6 Diskussion

### 6.1 Skrymdensitet

Beräkningen av skrymdensitet utfördes med tre olika metoder (torr-, SSD-, och skjutmåttmetoden) då det är det ovanligt att blanda asfaltmassan med de mängder av gummi som använts, samt att interaktionen mellan det porösa elastiska gummit och bitumen är okänd. Vidare var det även svårt att bestämma om vatten rinner in i provkroppen eller bara vid kanterna. Resultatet visar att blandning 1 och 3 (25% gummi) har en högre skrymdensitet än blandning 2 och 4 (50% gummi) vilket betyder att dem har lägre hålrums halt, vilket stämmer överens med alla tre metoder. Beräkning för skrym-, och kompaktdensiteten bör modifieras med hänsyn till relationen mellan gummit och bitumenet (att gummit suger upp bitumen) vilket kan leda till förändring av volymen d.v.s. att bitumenet inte kan behålla sin volym eller att gummits volym förändras, jämfört med en vanlig provkropp (som bara innehåller sten och bitumen). Det kan kanske behöva ett samarbete med kemister för att kunna studera det noggrant utifrån andel av gummi, gummits fraktion, bitumens typ och med hänsyn till temperatur, vilket kan spela en avgörande roll i sig.

### 6.2 Hålrums halt

Flesta medelvärdet för resultatet av referensbeläggningen (ABT 8) visades sig ha ett acceptabelt värde inom gränsen enligt Trafikverkets krav för tät asfaltbetong d.v.s.  $3,5 \pm 1,0$  vol.-% (Trafikverket, 2005) (ett prov av sex provkroppar var över gräns). En studie genomförd av Viman (2011) studerade olika asfaltmassor, inklusive asfalt med gummimodifierat bitumen, med olika största sten fraktion för ett objekt, V 180 Alingsås, för bilvägar, med de bestämda hålrums halterna presenterade i Tabell 11.

Tabell 12: Resultat av asfaltmassor till objekt Alingsås utförda av Svevia (Viman, 2001).

Provmaterial	Hålrums halt (vol.-%)	
	(Vatten)	(Skjutmått)
ABS 11 70/100	6,6	11
GAP 8 70/100	6,6	7
GAP 11 70/100	4,5	6,8

GAP (Gummimodifierad asfaltmassa med partikelsprång), som är en tät asfaltbetong med gummimodifierat bitumen, är närbesläktad med ABS-beläggningar och används som slitlager. Enligt Trafikverket (2005) får hålrums halten för ABS 8 variera mellan  $3,7 \pm 1,0$  vol.-%, och för ABS 11 variera mellan 2 – 3,5 vol.-%. Med beaktande att kraven ställs för bilvägar med 1,5 - 2 vikt-% gummigranulat (i fraktion 0 - 2 mm) av totala mängden asfaltmassan, syns det

att hålrums halt för GAP 11 är två gånger högre än Trafikverkets krav för ABS 11. För GAP 8 är hålrums halten 1,5 gånger större än Trafikverkets krav. Utifrån mängden gummi i de olika blandningarna ses det att beräkningen enligt skjutmåttmetoden troligtvis är mer rimlig än de andra metoderna då torra metoden och SSD-metoden visade att hålrums halten i blandning 1 och 3 är lik eller högre än hålrums halten för blandning 2 och 4 vilket inte stämmer i helhet utifrån observationer vid vattenbadet (när provkroppar togs ur vattenbad för Marshallstabilitetstest rann mer vatten ur blandning 2 och 4 jämfört med blandning 1 och 3). Blandning 2 och 4 kändes även mjukare än dem andra i luftlagrad vilket gjorde att mer vatten tränger in vid läggning av provkropparna i vattenbadet 30 minuter innan Marshallstabilitetstest.

### 6.3 Temperatur

Enligt Trafikverkets krav bör en vanlig asfaltmassa med 70/100 bitumen packas vid temperaturer mellan 140 och 155 °C, och packningen ska ske med 2×50 slag (50 slag per sida). Enligt Nordgren (2011) ska massan som innehåller gummi blandas vid temperaturer kring  $165 \pm 5^\circ\text{C}$ . Temperaturen på det gummimodifierade bituminet ska vara mellan 165 – 175°C och det får inte överstiga 175 °C för att behålla gummits egenskaper. Kompaktering av provkroppar enligt SS-EN 12697–30 ska ske vid temperaturer mellan 170 och 175 °C och med 2×50 slag. Med koppling av denna information till arbetet syns det att det finns skillnad i temperaturer vid instampning av provkropparna, vilket kan vara en anledning till den låga hållfastheten som gummiblandningarna fått. Några eventuella anledningar för resultatet kan vara temperaturen vid blandningen (vilket var cirka 132 °C för alla beläggningarna), och även antalet slag vid kompakteringen d.v.s. räcker det med 2×50 slag eller behövs mer för att nå önskvärd packning och därmed att öka asfaltens stabilitet. Utifrån observationer under kompaktering ses att antal slag ska göras mer än 2x50 per sida eller höja gildmassansvikt då gummiblandningar kändes dumpande och detta orsakades att kroppshjöden inte ändrats så mycket jämfört med referens (ABT8) samt att förvaring av cylindermassan i värmeskåpet för lite längre tid (mer än 1 tim) innan kompaktering ger bättre stabilitet i massan efter det kompakteras. Detta kanske bero på att vid lite längre tid innan kompaktering tenderar det gummit i massan mer att attrahera andra komponenter i sig då gummit blir mjukare och mer interaktion sker i massan.

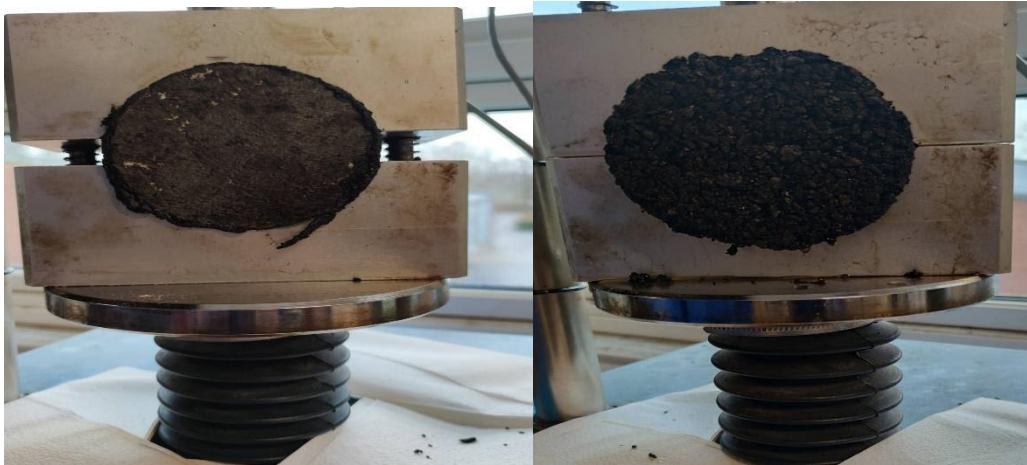
### 6.4 Hållfasthet

Egenskaper som hållfasthet hos en asfaltmassa beskriver massans förmåga att motstå lasten och detta beror på vilka egenskaper ingående material har i massan och hur dem reagerar vid belastning.

Resultaten från Marshalltestningen visar att referensbeläggningens (ABT 8) styvheten verkar minska med tiden, dock verkar inte lagringsförhållandet (torr eller våt) ha någon större inverkan på denna minskning, då standardavvikelserna för de undersökta proverna är för stor för att kunna dra några sådana slutsatser (se Figur 23). För gummibeläggningarna syns också att styvheten minskar över tiden för blandning 1 (25%, 0h) både torr- och våt lagrad och för blandning 2 (50%, 0h) bara för torr lagrad, medan syns ett annat mönster för övriga

blandningar där är det svårt att läget avgöras. Styvheten beräknas utifrån den punkt där lasten är som högst med resulterande deformation, vilken är tydligt hos referensprovkropparna (se Figur 22). För gummibeläggningsarna som inte visar samma form som referensbeläggningsarna har styvheten i stället beräknats i två olika punkter med syftet att försöka beräkna en rimlig styvhet, trots att standarden inte verkar helt möjlig att använda för gummibeläggningsarna. Den ena punkten (punkt 1) är vald efter den största last innan dess oken tar i varandra och påverkar mätningen, vilket också simulerar standarden utifrån högsta lasten som provet utsätts för och kurvans beteende. Den andra punkten (punkt 2) valdes för att simulera standarden utifrån kurvans utseende vid den högsta lasten.

Generellt visar resultaten att referensbeläggningsarna (ABT8) har en betydligt högre styvhet och är inte jämförbara med gummibeläggningsarna. Anledning till detta är att ABT8 består av olika stenfraktioner (0 – 4, 4 – 8 mm) vilka underlättar interaktion och orientering av material så att de bygger en tät massa som kan motstå lasten. Gummibeläggningsarna visar däremot ett annorlunda resultat med avsevärt lägre styvheter än referensen. Detta kan bero på olika orsaker, bland annat att gummit är ett elastiskt och poröst material som tenderar att ändra formen när det utsätts för påfrestningar, till skillnad från sten skelettet i en ABT8. En annan möjlig orsak är att förbehandling av gummi genom blandningen med bitumen kanske behövs vid högre temperaturer och blandas under längre tid för att gummit blir mätt vilket innebär att gummit inte absorberar längre mer bitumen (d.v.s. det rent bitumen som tilläggas för tillverkning av själva asfalten). En möjlig orsak kan vara brist på bitumen i massan för att gummit är poröst och bitumenet fyller porerna, vilket leder till att massan kommer behöva mer bitumen än den står i recepten för bättre vidhäftning mellan komponenter. Stensläpp har iakttagit under framställning och hanteringen av provkropparna. Det kan tänkas att det behövs förbättringar av modifikation av bitumen, optimering av fraktionerna av sten och mängden sten som ersätts av förbehandlat gummi. En möjlig orsak till den låga styvheten hos 50% gummiblandning provkroppar då kanske de inte hade tillräckligt plats att kompakteras på ett bra sätt. Andra saker som kan ha påverkat är framställningsmetod, packningen och antal slag vid packningen, då provkropparna tillverkades enligt standard för vanlig asfalt och kanske behövs en tyngre packningsvikt och/eller ett högre antal slag. Figur 38 visar en referensprovkropp och en gummiprovkropp efter ett utfärdat Marshalltest. Här syns det att gummikroppen inte spjånar emot belastningen till skillnad från referensen. Med anledning av detta kan det tänkas att Marshallstabilitetstestutrustningen inte passar, i nuvarande utformning, för att testa hållfastheten hos gummibeläggningsarna. För att tillåta testning behövs en vidareutvecklad metod, eftersom okulär besiktning av gummiprovkroppar gällande blandning 2 och 4 visade att de inte var särskilt på ytan jämfört med blandning 3 och 5 och kan motstå påtryckning av en människa.



Figur 38: Skillnad i beteende för Marshallstabilitetstest vid provning av referens (ABT8) och gummiblandningarna.

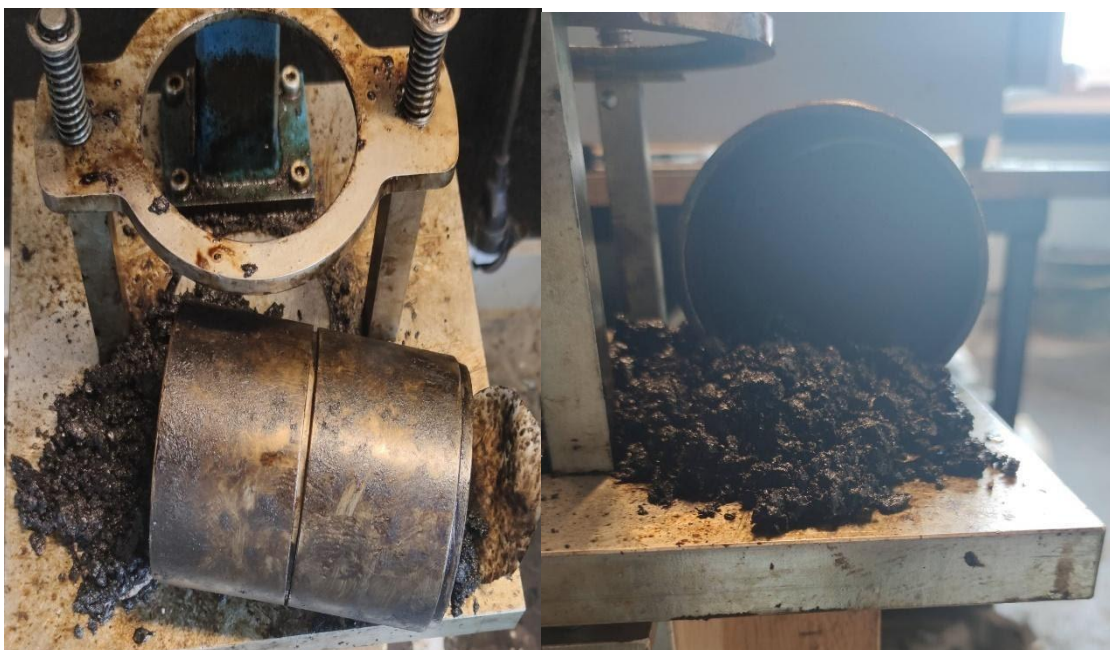
## 6.5 Metoddiskussion

Gällande problemen som stötts på under arbetet gång, genomfördes ett försök i laboratorium med syftet till att försöka mäta och beräkna kompaktdensitet och jämföra det med resultatet av de teoretiska sambanden som kan användas för att beräkna kompaktdensiteten (som gäller när massan består enbart av bitumen och sten) d.v.s. utan poröst material (gummit). Tyvärr lyckades inte detta försök på grund av att gummimaterialet flöt upp till ytan vid mätning av dess vikt i vatten.

För att kunna få ett säkrare resultat för hålrums halten i provkropparna utfördes ett annat försök med hjälp av ett vattenbad (36,1 x 36,1 x 31,6), mått och en våg. Mätningarna genomfördes genom att slumpmässigt välja tre torra provkroppar för alla blandningarna, därefter mättes provkroppens diameter och höjd för att kunna beräkna kroppens volym. Därefter vägdes provkroppen i luft och lades i vattnet, varefter provkroppens vikt i vattnet avlästes efter tre minuter och togs därefter upp ur vattnet och vägdes igen för att bestämma den vattenmättade vikten. Resultatet av experimentet användes sedan för beräkning av hålrums halt enligt tre standardmetoder.

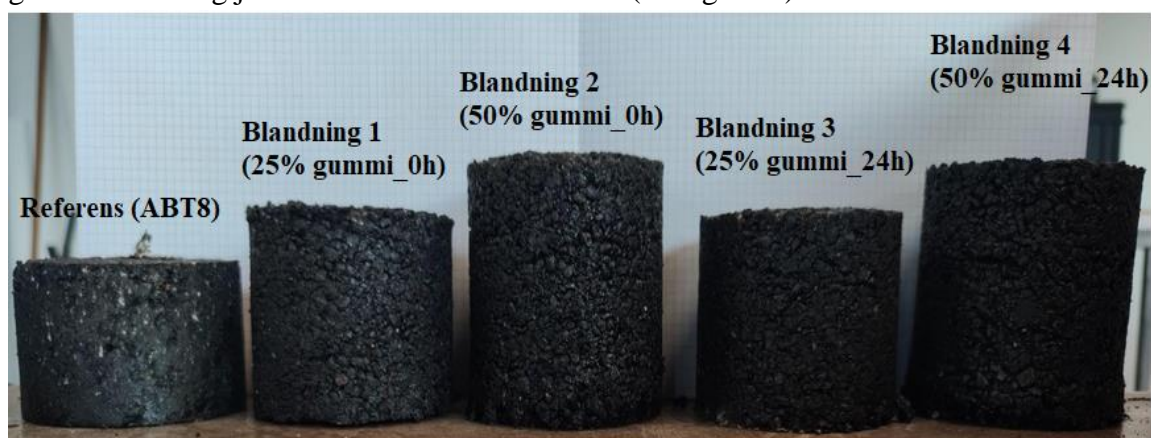
Trots att det inte finns stor skillnad i hållfasthet för de olika gummiblandningarna märktes en viktig skillnad, vilket kan vara till hjälp för eventuella fortsatta studier. Kompakteringen av blandning 2 och 4 var svår då provkropparna inte höll sig kvar i formen under vändningen till andra sida (d.v.s. efter 50 slag på ena sidan) eller vid överflyttning för att svalna (d.v.s. efter 50 slag per sida), se Figur 39. Detta medförde att massan behövde värmas upp igen innan kompakteringen. Blandning 2 var svårare än blandning 4, som har en skillnad i förbehandlingen (massan blandades direkt efter förbehandlingen respektive 24 timmar efter förbehandlingen). En lösning för det här problemet kan vara att undvika användning av smörjningspray som i vanliga fall används för att underlätta uttaget av kompakterade asfaltkroppar från formen.





Figur 39: Sammanbrott vid stampning av blandning 2 för olika provkroppar.

En tydlig skillnad mellan de olika blandningarna var tjockleken. För att få samma vikt med ca 1100 g per provkropp, varierade volymen av asfalt beroende på hur mycket gummi som var inblandat. Skillnader i tjocklek uppmättest till mellan 20 och 50 mm beroende på gummiblandning jämfört med referensen ABT8 (se Figur 40).



Figur 40. Skillnad i tjocklek mellan olika blandningar. Från vänster i bild: referens (ABT8), blandning 1 (25%- direkt), blandning 2 (50%- direkt), blandning 3 (25%- 24h) och blandning 4 (50%- 24h).

Förbättring av utrustningarna krävs med syftet att undvika skador på provkropparna. Till exempel, cylinderformen som används vid stampning har en höjd på 100 mm medan provkropparna i blandning 2 och 4 har en aning högre höjd, vilket resulterade i att mer material lossnade från provkroppens kanter, vilket försvårade utpressningen ut formen.

Vid framställning av provkroppar i den kompakteringsutrustning som användes märktes det att utrustningen rörde sig lite vilket kunde påverka kraften som provkropparna utsätts för. En tänkbar lösning var att gripa utrustning fast med hand/fot.

## 7 Slutsatser

### 7.1 Slutsatser baserade på litteraturstudien

Följande slutsatser dras baserat på frågeställningen och litteraturstudien:

#### **Vilka egenskaper har den fallvänliga asfalten?**

Den fallvänliga asfalten kan minska skadegraden vid fallolyckor för gående och cyklister, eftersom den är fyra till fem gånger mjukare jämfört med den vanliga asfalten. Risken för allvarliga skador i huvudet ökar från en fallhöjd på 20 cm för vanlig asfalt till 85 - 100 cm med fallvänlig asfalt.

#### **Hur bidrar asfalt med gummigranulat till en hållbar utveckling och ökad trafiksäkerhet?**

Utifrån statistik om antal allvarliga skador för fotgängares fallolyckor och på cykelolycksstatistik, syns det att den nya typen av beläggningen kan vara avgörande för att undvika flera allvarliga olyckor, eller åtminstone lindra konsekvenserna av fallolyckor. Vid säkrare gång- och cykelbeläggningar kan antal cyklister komma att öka. Utifrån ett miljöperspektiv sett till återvinning av uttjänta däck på vägar, ges en fördel för miljön via att minska utsläppen av koldioxid med 1678 kg per ton jämfört med om däcken förbränns som sker om däcken istället går till förbränning ett vid energiverk, samt att lakhalten för gummigranulaten i vatten underskrider dricksvattenkvalitet.

#### **Vad är skillnaden mellan gummiasfalt och vanlig asfaltbeläggning med avseende på arbetsrecept, funktionalitet, dimensionering och livslängd?**

Gällande arbetsrecept syns skillnader i att den fallvänliga asfalten innehåller mer bitumen än den vanliga asfalten, där den fallvänliga asfalten först förbehandlar gummit med bitumen innan det blandas till en asfaltmassa med ballasten och rent bitumen. En annan eventuell skillnad är gällande förbehandlingstiden (att olika ingående material kan blandas direkt som en vanlig asfaltmassa eller att finnas en viss vilotid för den förbehandlade gummit innan det används för blandning av asfaltmassa).

Gällande dimensionering finns inga skillnader eftersom den fallvänliga asfalten skulle ersätta det vanliga slitlagret, vilket betyder att dimensionering för underliggande lager inte påverkas. Vid utläggning av den fallvänliga asfalten i gatumiljö vid underhållsarbete är det dock okänt om särskilt vidhäftningsmedel eller annat behövs.

Gällande livslängd och funktionalitet för gång- och cykelbanor, kan den vanliga asfalten såsom tät asfaltbetong (t.ex. ABT 8), utifrån den belastning som den utsätts för, få en livslängd som är högre än 20 år. Livslängden för den fallvänliga asfalten är okänd, då det tidigare inte var en avgörande faktor fram tills nu då resultatet av de båda beläggningar som lades i Sverige är har stor variation, samt att beläggningstypen fortfarande är under utveckling vilket kan leda till en längre livslängd.

## **Vilka faktorer kan påverka beläggnings hållbarhet?**

Det finns flera faktorer som kan påverka en beläggning:

- Arbetsrecepten vilket innehåller viktiga informationer om kornstorleksfördelningskurva, ballastkvalitet, bindemedelstyp, bindemedelshalt, typ av eventuella tillsatser, skrymdensitet och kompaktdensitet.
- Klimatfaktorer som temperatur, frost, regn och fukt.
- Befintliga markförhållande och de i beläggnings ingående materialens hållfasthetsegenskaper.
- Väderförhållanden vid utläggning och utläggningsmaskinerna.
- Drift- och underhållsarbete.
- Sist men inte minst att gång- och cykelbanor bör vara överdimensionering för att hänsyn tas till de kan belastas av drift- och underhållsfordon och uttryckningsfordon, samt för att förhindra tjälskador och skador till följd av trädrötter i beläggnings.

## **7.2 Slutsatser baserade på laboratoriestudien**

Utifrån resultatet av arbetet i laboratoriet kan följande slutsatser dras:

- Marshallstabilitetstestet är inte användbar för gummibeläggningar i sin nuvarande utformning, vilket gör jämförelse mellan referensblandningen ABT8 och gummiblandningarna orättvis. Därför rekommenderas inte den typ av tester, utan en vidareutveckling av metoden föreslås.
- Analys av resultatet för hållfastheten i de båda studerande punkter är nästan lika, vilket kan utnyttjas vid en vidareutveckling av Marshallstabilitetsmetoden eller på ett någon annan standard.
- Gummiblandningarna med 50% ersättning var mjukare än övriga provkroppar, då den vid okulär besiktning kunde deformeras med hjälp av tryck med fingrar efter 14 dagar.
- Gummiblandningarna med 25% var hårdare och mer lika referensen (ABT8), då dessa inte kunde deformeras med fingrarna efter 14 dagar.
- Under laborationsarbetet studerades flera gummibitar genom att skära dem itu med en kniv. Det iaktogs att gummibiten hade ej smält samman med bitumenet i mitten, vilket visar att det behövs en högre temperatur och en tillräcklig bitumenhalt så att gummit suger upp tillräckligt med bitum. Detta kan leda till att vidhäftningen för det förbehandlade gummit ökar.
- För låg temperatur vid kompaktering gjorde att massan blev mer benägen att falla sönder. Vid längre uppvärmning i värmeskåp (över en timme), minskade problemet med att massan föll sönder före respektive under uttryckning.
- Det upptäcktes att formen för provkroppen vid stampning (cylinderhöjden) och pressutrustningen är inte helt anpassad till asfalt med hög andel gummi (50% gummi), då massan hamnar i kant med formen och därmed kan påverka provkroppen.

- Antalet slag som används vid kompaktering kan behöva ökas, alternativt att vikten hos glidmassan ökas för att få bättre kompaktering, och därigenom minska problemen med sönderfallande provkroppar. Detta bör även minska problemet med ovanstående punkt.
- För en mer representativ beräkning av hålrumshalten bör kompaktdensiteten mätas istället för att teoretiskt beräknas.

## 8 Rekommendationer för fortsatta studier

För materialprovning rekommenderas mer studier om relationen mellan gummit och bitumenet vilket syftar till att hitta den totala mängden av bitumen som gummit skulle absorbera (för att behålla det rena bitumenets mängd och egenskaper som att hålla ihop ballasten). Det rekommenderas också laborationsarbete med ett större antal provkroppar med olika förutsättningar enligt följande:

- Mer bitumen vid förbehandling av gummit (testa mer än 10% av gummits vikt), och se vilka skillnader skulle fås med avseende på styvheten. Syftet är att veta punkten som gummit blir helt mättat av bitumen.
- Undersöka hur temperaturen och blandningstiden mellan gummi och bitumen vid förbehandlingen inverkar på dess egenskaper.
- Undersöka inverkan av hårdare bitumen (t.ex. 50/70) eller mjukare bitumen (t.ex. 100/150) och jämför det med det bitumen som används i denna studie, d.v.s. 70/100.
- Undersöka inverkan av andra gummifraktioner än fraktion 2–6 mm som användes i detta arbete och se hur det kommer att påverka styvheten.
- Undersökning av ersättning av stenmaterial i rätt fraktioner (t.ex. 0–4 mm stenmaterial ersättas med gummi 0–4 mm också).
- Olika vilotider för det förbehandlade gummit före blandning till asfalt jämfört med 0 respektive 24 h vilotid som i detta arbete. T.ex. en vilotid om 12 timmar eller 36 timmar.
- Framställning av provkroppar föreslås att ske via att först tillverka plattor av asfalten och sedan borra dem. Detta för att få en mer representativ packning så som i fält.
- Undersöka andra temperaturer vid blandning till asfaltmassa än temperaturen använd i detta arbete.
- Undersöka andra temperaturer vid kompaktering än den som användes i detta arbete.
- Undersöka vid vilken temperatur som gummits egenskaper förändras vid tillverkning och kompaktering av asfaltmassor.
- Undersöka hur många slag som krävs vid Marshallkompaktering för att få en önskvärd kompaktering av provkropparna.
- Undersöka om en högre glidvikt ger bättre kompaktering av gummimassorna vid Marshallkompaktering.
- Vid fältförsök bör provtagning genomföras på borrhärdar för att undersöka beläggnings faktiska fältegenskaper och jämföra dem mot provkroppar framtagna i laboratoriemiljö.

Slutningen rekommenderas att utgå från relationen mellan gummit och bitumen, vilket kan leda till bättre förståelse kring vilken bitumentyp, vilken bitumenandel och vilka gummitfraktioner som ger en mer optimal blandning.

## 9. Referenslista:

Agardh, S & Parhamifar, E. 2014. Vägbyggnad, upplag 1, ISBN 9 789 147 093 465, Liber AB.

Andersson, A. Persson, B. Jacobson, T. 2006. Tillsatsmedel i asfaltpåverkan på arbetsmiljö och omgivning (2006-02-06).

Ardefors, F och Roupe, J. 2019. Vägen mot hållbarhet - inom Däckbranschen Sverige. Version 1.0.

Asfaltboken kap 5. 1999. Bindemedel <https://asfaltboken.se/bindemedel/>

Asfaltboken kap 6. 2020. Tillsatsmedel <https://asfaltboken.se/tillsatsmedel/>

Asfaltboken kap 7. 2013. Val av beläggning <https://asfaltboken.se/val-av-belaggnings/>

Bandini, P. 2011. Rubberized Asphalt Concrete Pavements in New Mexico, Department of Civil Engineering New Mexico State University, New Mexico.

Bjurström, H. 2020. Fallskadereducerande beläggning för trafikerbar yta. Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI), Linköping.

Cheng, D. m.fl. 2012. Rubber Modified Asphalt Technical Manual, Ontario Tire Stewardship, Toronto.

Dagens Nyheter. 2021. Ben och liv kan räddas med mjukare asfalt. Hämtad den 03-05-2021 från <https://www.sdab.se/media-press/mediabibliotek/ben-och-liv-kan-raeddass-med-mjukare-asfalt/>

Genan. 2020. Miljötest och materialbeskrivning. Hämtade 2021-04-18 <https://drive.google.com/file/d/1u1XyhtBPFQiwISEmb0x3ab0ZNPgMCMs5/view>

Genan. 2021. TEKNISK DATABLAD. [https://www.genan.eu/wp-content/uploads/2021/03/2021\\_TDS\\_GENAN-ULTRA-COARSE\\_DK.pdf](https://www.genan.eu/wp-content/uploads/2021/03/2021_TDS_GENAN-ULTRA-COARSE_DK.pdf)

Hultqvist Bengt-Åke. 1993. Asfaltbeläggningar Deformationsegenskaper-Kunskapsöversikt. VTI notat 205. Statens Väg- och transportforskningsinstitut.

Jönsson, G. 2007. Fysik i vätskor och gaser. 6. uppl. Lund: Teach Support

Ljungblad, H och Zajc, A. 2014. Drift och underhåll av cykelvägar – avtalsmässiga hinder och möjligheter. Koucky 6 Partners AB.

Massbalans, 2020. VÄRLDSPREMIÄR FÖR FALLVÄNLIG CYKELBANA. Hämtade 2021-05-07 <https://www.massbalans.com/fallvaenlig-cykelvaeg-gummi-asfalt>

Massbalans, 2020 a. Världspremiär för fallvänlig asfalt i Lund. Hämtade 2021-04-25 <https://mb.cision.com/Main/19627/3151175/1276803.pdf>

Niska, A. 2006. Cykelvägars drift- och underhållsstandard - Intervjuer med 13 cykelkommuner. Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI), Linköping.

Niska, A. 2011. Cykelvägars standard En kunskapsställning med fokus på drift och underhåll. Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI), Linköping.

Nordgren, T. 2011. Handledning för tillverkning av asfaltmassa/beläggning med gummimodifierat bitumen, 2011, version 5. Hämtade 2021-05-10 <https://docplayer.se/34921252-Handledning-for-tillverkning-av-asfaltmassa-belaggnig-med-gummimodifierat-bitumen-2011.html>

Parhamifar, E. 2019. kompendium övningar och laborationshandledning. LTH.

Ragn-Sells. 2018. Däckgranulat på planen sänker miljöpåverkan på flera sätt. Hämtad från <https://www.ragnsellstyrerecycling.com/article-startpage/LCA-granulat/> den 14-03-2021

Ragn-Sells, 2018 a. Gummigranulat - användningsområden. Hämtat 2021-04-03, från <https://www.ragnsellstyrerecycling.com/atervunna-material/gummigranulat/>

Ragn - Sells AB. 2019. Däckets väg i återvinningsprocessen. Hämtat 2021-04-03, från <https://www.ragnsellstyrerecycling.com/article-startpage/dackets-vag-i-atervinningsprocessen/>

RISE. 2018. Förlåtande asfalt för cykel- och gångbanor.

RISE. 2018a. Mjuka cykelbanor dampar fall, Hämtad den 10-03-2021 från <https://www.ri.se/sv/berattelser/mjuka-cykelbanor-dampar-fall>

RISE. 2020. Världspremiär för fallvänlig asfalt på cykelväg i Lund

Schylander. J. 2014. Fallolyckor- Statistik och analys. ISBN 978-91-7383-487-2.

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)

Silvrano A. Dantas Neto, Márcio M. Farias, Jorge C. Pais, Paulo A. A. Pereira, 2006.

Influence of Crumb Rubber Gradation on Asphalt-Rubber Properties.

SKL. 2010. Gcm-HANDBOK - utformning, driftunderhållning med gång-, cykel- och mopedtrafik i fokus.

SKL. 2015. Trafik för en attraktiv stad - underlag till handbok. Utgåva 3, ISBN: 978-91-7585-275-1.

SKR. 2021. Drift och underhåll. Hämtad 05-04-2021, från <https://skr.se/samhallsplaneringinfrastruktur/trafikinfrastruktur/driftochunderhall.291.html>

STR Media AB. 2004. sid. 205, 261. ISBN 9 186 874 888\_ Hämtade 2021-03-12 <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/transporter-och-infrastruktur/mal-for-transporter-och-infrastruktur/>

Svensk Cykling. 2018. Cykeltrendrapport. Hämtad den 21-02-2021 från \_ Massbalans, 2020.

Trafikverket. 1994. VÄG 1994. Kap 6 Bitumenbundna lager. VV Publ 1994:26

Trafikverket. 2003. ATB VÄG, dimensionering. VV Publ 2003:111

Trafikverket. 2005. ATB VÄG.

Trafikverket. 2011. Bestämning av vattenkänslighet genom pressdragprovning. Publ 2011:005

Trafikverket. 2011. TRVK Väg -Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion. TDOK 2011:264.

Trafikverket. 2011a. TRVKB 10 Bitumenbundna lager Trafikverkets Krav Beskrivningstexter för Bitumenbundna lager i vägkonstruktioner. TRV 2011:082.

Trafikverket. 2014. Vägbelysning Handboken. Version 4.

Trafikverket. 2015. KRAV Bitumenbundna lager, TDOK 2013: 0529

Trafikverket. 2016. Vägars och gators utformning - Stödande kunskap, ISBN: 978-91-7467-970.

Trafikverket. 2019. Berg, H.-Y., Å. Forsman, and R. Fredriksson. Hur såg trafiksäkerhetsutvecklingen ut 2018? in Resultatkonferens trafiksäkerhet 2019.

Trafikverket. 2021. Transportpolitiska mål. Hämtade den 04-12-2021. <https://www.trafikverket.se/om-oss/var-verksamhet/2020-i-korthet/transportpolitiska-mal/>

Trivector. 2018. Förlåtande beläggning på cykelbanor - Var ska den placeras?



Täby kommun. 2020. Trafik och Gata- Dimensionering av överbyggnader.

Viman, L. 2009. Gummiastfalt -Laboratorieförsök. Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI), Linköping.

Viman m.fl. 2014. Provsträckor med gummiastfalt Ragn-Sells infart vid granulat-anläggningen, Heljestorp. Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI), Linköping.

Viman, L. 2011. Gummiastfaltbeläggning Sammanställning av utförda mätningar och provningar. Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI), Linköping.

Vägverket (2004) Vägar och gators utformning, VGU 2004. Vägverket butiken. Borlänge. ISSN: 1401-9612.

# 10 Bilagor

Bilaga 1: Skrymdensitet och hålrums halt för referens (ABT8) efter 7 dygn och 14 dygn enligt torrmetoden.

Referens (ABT8) 7 dygn	Vikt (g)		Skrymdensitet (g/cm <sup>3</sup> )	Kompaktdensitet (g/cm <sup>3</sup> )	Hålrums halt vol.-%
	I luft	I vatten			
Kropp					
1	1078,9	614,8	2,32	2,42	4,132
2	1088,5	621	2,32	2,42	4,132
3	1078,8	609,5	2,29	2,42	5,372
Medel			2,31		4,545
STDEV			0,02		0,716
Referens (ABT8) 7 dygn	Vikt (g)		Skrymdensitet (g/cm <sup>3</sup> )	Kompaktdensitet (g/cm <sup>3</sup> )	Hålrums halt (vol.-%)
	I luft	I vatten			
Kropp					
1	1138,1	654,05	2,35	2,42	2,893
2	1095,3	626,55	2,33	2,42	3,719
3	1106,5	633	2,33	2,42	3,719
Medel			2,34		3,444
STDEV			0,01		0,477

**Bilaga 2: Beräkning av skrymdensitet och hålrumsinhalt för alla gummiblandningar:**

**Bilaga 2.1: För gummiblandning 1: 25% \_ 0h.**

Dygn	Kropp	Torrsvikt (g)	Vikt i vatten (g)	Skrymdensitet (g/cm <sup>3</sup> )		Kompaktdensitet (g/cm <sup>3</sup> )	Hålrumsinhalt (vol.-%)		Diameter (mm)	Höjd (mm)
				Torrmetoden	Skjutmåttmetoden		Torrmetoden	Skjutmåttmetoden		
1 dygn	1	1084,8	491,7	1,825	1,638	2,12	13,897	22,735	104	78
	2	1166,8	526,5	1,819	1,619	2,12	14,216	23,633	101	90
	3	1088,05	507,2	1,869	1,698	2,12	11,818	19,886	101	80
	Medel						13,310	22,085		
	STDEV						1,302	1,957		
7 dygn	1	1086,65	494,5	1,831	1,623	2,12	13,612	23,463	102	82
	2	1080,9	486,5	1,815	1,564	2,12	14,395	26,239	103	83
	3	1083,65	489,15	1,819	1,531	2,12	14,191	27,791	103	85
	Medel						14,066	25,831		
	STDEV						0,406	2,193		
14 dygn	1	1041,9	465,45	1,804	1,626	2,12	14,914	23,284	101	80
	2	1049,95	482,05	1,845	1,543	2,12	12,966	27,239	101	85
	3	1087,95	498,1	1,841	1,586	2,12	13,172	25,196	102	84
	Medel						13,684	25,239		
	STDEV						1,07	1,98		

**Bilaga 2.2: För gummiblandning 2: 50% \_ 0h.**

Dygn	Kropp	Torrsvikt (g)	Vikt i vatten (g)	Skrymdensitet (g/cm <sup>3</sup> )		Kompaktdensitet (g/cm <sup>3</sup> )	Hålrumsinhalt (vol.-%)		Diameter (mm)	Höjd (mm)
				Torrmetoden	Skjutmåttmetoden		Torrmetoden	Skjutmåttmetoden		
1 dygn	1	1085,85	435,9	1,667	1,316	1,89	11,782	30,351	102	101
	2	1090,3	427,3	1,641	1,348	1,89	13,164	28,674	101	101
	3	1074,85	432,3	1,669	1,329	1,89	11,670	29,684	101	101
	Medel						12,205	29,570		
	STDEV						0,832	0,844		
7 dygn	1	1082,25	422,05	1,636	1,338	1,89	13,439	29,200	101	101
	2	1085,75	436,85	1,670	1,279	1,89	11,647	32,340	104	100
	3	1039,8	417,6	1,668	1,250	1,89	11,755	33,881	104	98
	Medel						12,281	31,807		
	STDEV						1,00	2,39		
14 dygn	1	1070,15	419,2	1,641	1,311	1,89	13,191	30,645	100	104
	2	1066,7	434,05	1,683	1,319	1,89	10,968	30,217	101	101
	3	1145,75	448,05	1,639	1,299	1,89	13,286	31,272	102	108
	Medel						12,48	30,71		
	STDEV						1,31	0,53		

**Bilaga 2.3: För gummiblandning 3: 25% \_ 24h.**

Dygn	Kropp	Torrsvikt (g)	Vikt i vatten (g)	Skrymdensitet (g/cm <sup>3</sup> )		Kompaktdensitet (g/cm <sup>3</sup> )	Hålrums halt (vol.-%)		Diameter (mm)	Höjd (mm)
				Torrmetoden	Skjutmåttmetoden		Torrmetoden	Skjutmåttmetoden		
1 dygn	1	1079,7	501,1	1,862	1,719	2,12	12,155	18,902	100	80
	2	1085,6	509,7	1,881	1,666	2,12	11,260	21,407	100	83
	3	1085,1	501	1,854	1,686	2,12	12,546	20,485	100	82
	Medel						11,99	20,26		
	STDEV						0,66	1,27		
7 dygn	1	1082,05	498,95	1,852	1,596	2,12	12,643	24,705	102	83
	2	1089,95	505,75	1,862	1,570	2,12	12,171	25,940	102	85
	3	1083,4	498,34	1,848	1,657	2,12	12,827	21,833	104	77
	Medel						12,55	24,16		
	STDEV						0,34	2,11		
14 dygn	1	1078,1	489,6	1,828	1,642	2,12	13,760	22,554	101	82
	2	1083,25	493,8	1,834	1,565	2,12	13,488	26,200	105	80
	3	1083,6	493,3	1,832	1,592	2,12	13,585	24,907	101	85
	Medel						13,611	24,554		
	STDEV						0,138	1,848		

**Bilaga 2.4: För gummiblandning 4: 50% \_ 24h.**

Dygn	Kropp	Torrsvikt (g)	Vikt i vatten (g)	Skrymdensitet (g/cm <sup>3</sup> )		Kompaktdensitet (g/cm <sup>3</sup> )	Hålrums halt (vol.-%)		Diameter (mm)	Höjd (mm)
				Torrmetoden	Skjutmåttmetoden		Torrmetoden	Skjutmåttmetoden		
1 dygn	1	1095,35	428,45	1,639	1,356	1,89	13,272	28,258	103	97
	2	1099,7	430,4	1,640	1,387	1,89	13,239	26,605	101	99
	3	1091,3	434,3	1,658	1,349	1,89	12,290	28,608	101	101
	Medel						12,93	27,82		
	STDEV						0,56	1,07		
7 dygn	1	1065,85	420,9	1,649	1,400	1,89	12,735	25,938	100	97
	2	1050,65	426,25	1,679	1,353	1,89	11,149	28,433	101	97
	3	1086,4	422,6	1,633	-	1,89	13,579	-	-	-
	Medel						12,49	27,19		
	STDEV						1,23	1,76		
14 dygn	1	1084,9	432,7	1,660	1,410	1,89	12,163	25,384	100	98
	2	1092,05	436,9	1,664	1,392	1,89	11,982	26,372	101	98
	3	1087,5	432,15	1,656	1,385	1,89	12,376	26,701	100	100
	Medel						12,174	26,152		
	STDEV						0,197	0,685		

**Bilaga 3: Beräkning av skrymdensitet och hålrums halt enligt olika standardmetoder.**

**För gummiblandning 1: 25% \_ 0h.**

Kropp	Skrymdensitet (cm <sup>3</sup> )			Kompaktdensitet (cm <sup>3</sup> )	Hålrums halt (vol.-%)		
	Torrmetod	Mättad yta torr	Skjutmåttmetod		Torrmetod	Mättad yta torr	Skjutmåttmetod
<b>1</b>	1,868	1,73	1,55	2,12	11,88	18,53	26,84
<b>2</b>	1,870	1,74	1,77	2,12	11,78	17,92	16,52
<b>3</b>	1,846	1,73	1,76	2,12	12,91	18,35	17,02
<b>Medel</b>	1,86	1,73	1,69	2,12	12,19	18,27	20,13

**För gummiblandning 2: 50% \_ 0h.**

Kropp	Skrymdensitet (cm <sup>3</sup> )			Kompaktdensitet (cm <sup>3</sup> )	Hålrums halt (vol.-%)		
	Torrmetod	Mättad yta torr	Skjutmåttmetod		Torrmetod	Mättad yta torr	Skjutmåttmetod
<b>1</b>	1,654	1,54	1,36	1,89	12,51	18,74	27,96
<b>2</b>	1,682	1,56	1,45	1,89	10,99	17,72	23,29
<b>3</b>	1,703	1,58	1,32	1,89	9,92	16,56	29,90
<b>Medel</b>	1,679	1,556	1,379	1,890	11,140	17,670	27,052

**För gummiblandning 3: 25% \_ 24h.**

Kropp	Skrymdensitet (cm3)			Kompaktdensitet (cm3)	Hålrums halt (vol.-%)		
	Torrmätod	Mättad yta torr	Skjutmåttmetod		Torrmätod	Mättad yta torr	Skjutmåttmetod
<b>1</b>	1,863	1,72	1,65	2,12	12,12	18,98	22,06
<b>2</b>	1,853	1,74	1,74	2,12	12,58	17,91	17,95
<b>3</b>	1,891	1,78	1,63	2,12	10,81	16,17	23,16
<b>Medel</b>	<b>1,869</b>	<b>1,745</b>	<b>1,674</b>	<b>2,120</b>	<b>11,832</b>	<b>17,687</b>	<b>21,055</b>

**För gummiblandning 4: 50 % \_ 24h.**

Kropp	Skrymdensitet (cm3)			Kompaktdensitet (cm3)	Hålrums halt (vol.-%)		
	Torrmätod	Mättad yta torr	Skjutmåttmetod		Torrmätod	Mättad yta torr	Skjutmåttmetod
<b>1</b>	1,699	1,56	1,37	1,89	10,13	17,20	27,75
<b>2</b>	1,685	1,55	1,32	1,89	10,87	17,88	30,23
<b>3</b>	1,691	1,54	1,36	1,89	10,52	18,78	28,11
<b>Medel</b>	<b>1,691</b>	<b>1,551</b>	<b>1,348</b>	<b>1,890</b>	<b>10,507</b>	<b>17,951</b>	<b>28,698</b>



**Bilaga 4: Detaljande information om beräkning av styvheten för referens och alla gummiblandningar i punkt (1).**

**Bilaga 4.1: För Referens (ATB8)**

<b>Torr</b>	<b>Kropp</b>	<b>Kraft (N)</b>	<b>Korrigerig</b>	<b>Stabilitet (N)</b>	<b>Töjning (mm)</b>	<b>Styvhet (N/mm)</b>	<b>Diameter (mm)</b>	<b>Höjd (mm)</b>
1 Dygn	1	12,615	1,233	15,549	2,213	7,026	105	57
	2	8,727	1,233	10,757	2,675	4,021	105	57
	3	8,956	1,193	10,681	3,398	3,143	102	58
Medel						4,730		
STDEV						2,036		
7 Dygn	1	8,497	1,193	10,134	3,656	2,772	101	58
	2	8,613	1,319	11,360	1,978	5,743	100	55
	3	7,337	1,193	8,750	3,352	2,610	101	58
Medel						3,708		
STDEV						1,764		
14 Dygn	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	7,73	1,275	9,853	3,072	3,207	103	56
	3	8,358	1,319	11,024	2,853	3,864	103	55
Medel						3,536		
STDEV						0,464		
<b>Vått</b>	<b>Kropp</b>	<b>Kraft (N)</b>	<b>Korrigerig</b>	<b>Stabilitet (N)</b>	<b>Töjning (mm)</b>	<b>Styvhet (N/mm)</b>	<b>Diameter (mm)</b>	<b>Höjd (mm)</b>
1 Dygn	1	11,84	1,319	15,616	2,083	7,497	104	55
	2	10,713	1,319	14,130	2,171	6,508	104	55
	3	10,595	1,319	13,974	2,313	6,042	104	55
Medel						6,682		
STDEV						0,743		
7 Dygn	1	6,813	1,319	8,986	1,978	4,543	100	55
	2	8,593	1,319	11,334	2,241	5,057	102	55
	3	7,608	1,275	9,698	3,733	2,598	100	56
Medel						4,066		
STDEV						1,297		
14 Dygn	1	8,831	1,155	10,196	4,137	2,465	100	59
	2	10,062	1,275	12,826	2,509	5,112	103	56
	3	8,712	1,275	11,105	3,849	2,885	100	56
Medel						3,487		
STDEV						1,423		

**Bilaga 4.2: Gummiblandning 1: 25% \_ 0h (punkt 1).**

Torr	Kropp	Kraft (N)	Korrigering	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	10,153	0,680	6,905	17,142	0,403	104	78
	2	-	0,518	-	-	-	101	90
	3	5,888	0,648	3,816	17,01	0,224	101	80
Medel						0,314		
STDEV						0,126		
7 Dygn	1	5,694	0,619	3,522	16,486	0,214	102	82
	2	6,74	0,604	4,074	16,14	0,252	103	83
	3	4,312	0,578	2,491	16,806	0,148	103	85
Medel						0,205		
STDEV						0,053		
14 Dygn	1	4,544	0,648	2,945	16,087	0,183	101	80
	2	3,835	0,578	2,216	16,579	0,134	101	85
	3	3,434	0,591	2,029	16,2	0,125	102	84
Medel						0,147		
STDEV						0,031		
Våt	Kropp	Kraft (N)	Korrigering	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	5,418	0,578	3,131	16,36	0,191	98	85
	2	5,769	0,633	3,652	16,441	0,222	100	81
	3	6,162	0,633	3,901	16,522	0,236	100	81
Medel						0,217		
STDEV						0,023		
7 Dygn	1	3,166	0,664	2,102	14,278	0,147	104	79
	2	3,848	0,714	2,749	15,023	0,183	103	76
	3	5,35	0,733	3,919	15,313	0,256	103	75
Medel						0,195		
STDEV						0,055		
14 Dygn	1	3,904	0,565	2,206	15,218	0,145	103	86
	2	4,573	0,714	3,267	16,666	0,196	105	76
	3	4,668	0,697	3,253	17,48	0,186	101	77
Medel						0,176		
STDEV						0,027		

**Bilaga 4.3: Gummiblandning 2: 50 % \_ 0h. (Punkt 1).**

Torr	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	3,27	0,417	1,362	16,562	0,082	102	101
	2	3,749	0,417	1,562	15,772	0,099	101	101
	3	4,749	0,417	1,979	15,772	0,125	101	101
Medel						0,102		
STDEV						0,022		
7 Dygn	1	3,749	0,417	1,562	16,653	0,094	101	101
	2	3,136	0,425	1,331	16,135	0,083	104	100
	3	2,398	0,441	1,058	16,2	0,065	104	98
Medel						0,081		
STDEV						0,014		
14 Dygn	1	3,344	0,394	1,318	16,853	0,078	100	104
	2	2,532	0,417	1,055	16,628	0,063	101	101
	3	3,344	0,367	1,227	16,853	0,073	102	108
Medel						0,071		
STDEV						0,007		
Vät	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	2,999	0,409	1,226	16,016	0,077	102	102
	2	2,713	0,387	1,050	17,202	0,061	101	105
	3	3,332	0,394	1,313	15,941	0,082	101	104
Medel						0,073		
STDEV						0,011		
7 Dygn	1	3,642	0,477	1,739	16,512	0,105	104	94
	2	2,949	0,433	1,276	16,547	0,077	101	99
	3	3,306	0,425	1,404	16,293	0,086	102	100
Medel						0,090		
STDEV						0,014		
14 Dygn	1	3,231	0,425	1,372	16,529	0,083	101	100
	2	3,005	0,394	1,184	16,242	0,073	102	104
	3	2,934	0,409	1,200	16,567	0,072	101	102
Medel						0,076		
STDEV						0,006		

**Bilaga 4.4: Gummiblandning 3: 25% \_ 24h. (punkt 1).**

Torr	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	6,001	0,648	3,890	16,288	0,239	100	80
	2	5,064	0,604	3,061	15,488	0,198	100	83
	3	4,772	0,619	2,952	16,724	0,176	100	82
Medel						0,204		
STDEV						0,032		
7 Dygn	1	5,085	0,604	3,074	16,158	0,190	102	83
	2	4,74	0,578	2,739	16,57	0,165	102	85
	3	6,6347	0,697	4,624	15,957	0,290	104	77
Medel						0,215		
STDEV						0,066		
14 Dygn	1	5,168	0,619	3,197	15,021	0,213	101	82
	2	5,226	0,648	3,387	16,298	0,208	105	80
	3	3,648	0,578	2,108	16,423	0,128	101	85
Medel						0,183		
STDEV						0,047		
Våt	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	3,436	0,619	2,125	16,502	0,129	100	82
	2	4,766	0,680	3,241	17,024	0,190	100	78
	3	3,751	0,648	2,431	17,003	0,143	100	80
Medel						0,154		
STDEV						0,032		
7 Dygn	1	5,21	0,619	3,223	16,888	0,191	102	82
	2	4,419	0,604	2,671	16,735	0,160	101	83
	3	3,907	0,604	2,362	16,12	0,147	101	83
Medel						0,166		
STDEV						0,023		
14 Dygn	1	3,443	0,680	2,341	15,996	0,146	102	78
	2	4,404	0,553	2,435	15,843	0,154	102	87
	3	1,872	2,412	4,516	17,16	0,263	104	40
Medel						0,188		
STDEV						0,065		

**Bilaga 4.2: Gummiblandning 4: 50% \_ 24h. (Punkt 1).**

Torr	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	3,672	0,450	1,652	17,526	0,094	103	97
	2	2,714	0,433	1,174	16,214	0,072	101	99
	3	2,053	0,417	0,855	16,476	0,052	101	101
Medel						0,073		
STDEV						0,021		
7 Dygn	1	2,544	0,450	1,144	16,308	0,070	100	97
	2	3,312	0,450	1,490	18,152	0,082	101	97
	3	-	-	-	-	-	-	-
Medel						0,076		
STDEV						0,008		
14 Dygn	1	3,062	0,441	1,351	17,261	0,078	100	98
	2	2,458	0,441	1,084	17,607	0,062	101	98
	3	2,821	0,425	1,198	17,666	0,068	100	100
Medel						0,069		
STDEV						0,008		
Våt	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	3,72	0,450	1,673	15,881	0,105	101	97
	2	3,133	0,394	1,235	16,382	0,075	103	104
	3	2,878	0,409	1,177	16,247	0,072	101	102
Medel						0,084		
STDEV						0,018		
7 Dygn	1	3,273	0,425	1,390	17,958	0,077	100	100
	2	2,297	0,401	0,922	17,922	0,051	100	103
	3	2,961	0,417	1,234	18,556	0,066	100	101
Medel						0,065		
STDEV						0,013		
14 Dygn	1	2,461	0,468	1,152	17,94	0,064	100	95
	2	2,952	0,441	1,302	16,654	0,078	100	98
	3	2,827	0,409	1,156	16,177	0,071	100	102
Medel						0,071		
STDEV						0,007		

**Bilaga 5: Detaljande information om beräkning av styvheten för referens och alla gummiblandningar i punkt (2). Bilaga 5.1: För gummiblandning 1: 25% -0h.**

Torr	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	7,697	0,680	5,234	8,277	0,632	104	78
	2	-	0,518	-	-	-	101	90
	3	3,882	0,648	2,516	7,901	0,318	101	80
Medel						0,475		
STDEV						0,222		
7 Dygn	1	4,462	0,619	2,760	8,736	0,316	102	82
	2	4,815	0,604	2,911	7,418	0,392	103	83
	3	3,13	0,578	1,809	8,536	0,212	103	85
Medel						0,307		
STDEV						0,091		
14 Dygn	1	3,85	0,648	2,496	10,421	0,239	101	80
	2	2,851	0,578	1,647	10,967	0,150	101	85
	3	2,645	0,591	1,563	7,703	0,203	102	84
Medel						0,198		
STDEV						0,045		
Våt	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	4,127	0,578	2,385	9,285	0,257	98	85
	2	4,103	0,633	2,598	8,307	0,313	100	81
	3	3,987	0,633	2,524	7,935	0,318	100	81
Medel						0,296		
STDEV						0,034		
7 Dygn	1	2,711	0,664	1,800	7,992	0,225	104	79
	2	3,392	0,714	2,423	8,566	0,283	103	76
	3	4,925	0,733	3,608	10,216	0,353	103	75
Medel						0,287		
STDEV						0,064		
14 Dygn	1	2,654	0,565	1,500	8,439	0,178	103	86
	2	3,728	0,714	2,663	9,358	0,285	105	76
	3	4,005	0,697	2,791	9,759	0,286	101	77
Medel						0,249		
STDEV						0,062		

**Bilaga 5.2: För gummiblandning 2: 50 % \_ 0h. (Punkt 1).**

Torr	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	1,693	0,417	0,705	6,578	0,107	102	101
	2	2,059	0,417	0,858	6,26	0,137	101	101
	3	1,919	0,417	0,800	6,063	0,132	101	101
Medel						0,125		
STDEV						0,016		
7 Dygn	1	2,589	0,417	1,079	9,514	0,113	101	101
	2	2,279	0,425	0,968	8,547	0,113	104	100
	3	1,783	0,441	0,787	7,852	0,100	104	98
Medel						0,109		
STDEV						0,008		
14 Dygn	1	1,782	0,394	0,702	7,989	0,088	100	104
	2	2,086	0,417	0,869	8,028	0,108	101	101
	3	2,181	0,367	0,800	8,599	0,093	102	108
Medel						0,096		
STDEV						0,011		
Våt	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	2,698	0,409	1,103	12,042	0,092	102	102
	2	2,059	0,387	0,797	9,503	0,084	101	105
	3	2,457	0,394	0,968	10,165	0,095	101	104
Medel						0,090		
STDEV						0,006		
7 Dygn	1	2,717	0,477	1,297	9,549	0,136	104	94
	2	2,134	0,433	0,923	9,363	0,099	101	99
	3	2,137	0,425	0,907	9,085	0,100	102	100
Medel						0,111		
STDEV						0,021		
14 Dygn	1	2,098	0,425	0,891	8,578	0,104	101	100
	2	2,119	0,394	0,835	8,803	0,095	102	104
	3	1,934	0,409	0,791	9,602	0,082	101	102
Medel						0,094		
STDEV						0,011		

**Bilaga 5.3: För gummiblandning 3: 25% \_ 24h. (Punkt 2).**

Torr	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	4,079	0,648	2,644	6,741	0,392	100	80
	2	4,024	0,604	2,432	6,721	0,362	100	83
	3	3,847	0,619	2,380	8,847	0,269	100	82
Medel						0,341		
STDEV						0,064		
7 Dygn	1	5,645	0,604	3,412	8,92	0,383	102	83
	2	3,996	0,578	2,309	8,518	0,271	102	85
	3	3,449	0,697	2,404	8,044	0,299	104	77
Medel						0,317		
STDEV						0,058		
14 Dygn	1	4,091	0,619	2,530	7,705	0,328	101	82
	2	4,201	0,648	2,723	8,461	0,322	105	80
	3	2,898	0,578	1,674	8,485	0,197	101	85
Medel						0,283		
STDEV						0,074		
Våt	Kropp	Kraft (N)	Korrigerig	Stabilitet (N)	Töjning (mm)	Styvhet (N/mm)	Diameter (mm)	Höjd (mm)
1 Dygn	1	2,677	0,619	1,656	8,136	0,204	100	82
	2	3,547	0,680	2,412	7,706	0,313	100	78
	3	2,856	0,648	1,851	9,079	0,204	100	80
Medel						0,240		
STDEV						0,063		
7 Dygn	1	2,94	0,619	1,818	7,359	0,247	102	82
	2	3,056	0,604	1,847	8,854	0,209	101	83
	3	2,845	0,604	1,720	8,388	0,205	101	83
Medel						0,220		
STDEV						0,023		
14 Dygn	1	2,99	0,680	2,033	9,392	0,216	102	78
	2	3,63	0,553	2,007	9,023	0,222	102	87
	3	1,779	2,412	4,292	9,777	0,439	104	40
Medel						0,293		
STDEV						0,127		

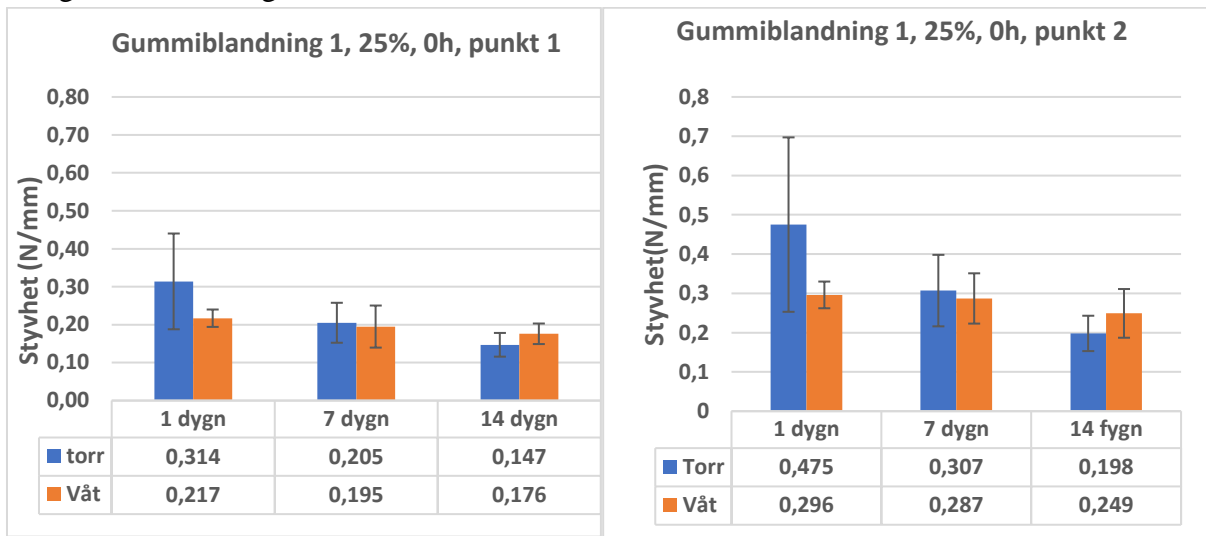


**Bilaga 5.4: För gummiblandning 4: 50% \_ 24h. (Punkt 2).**

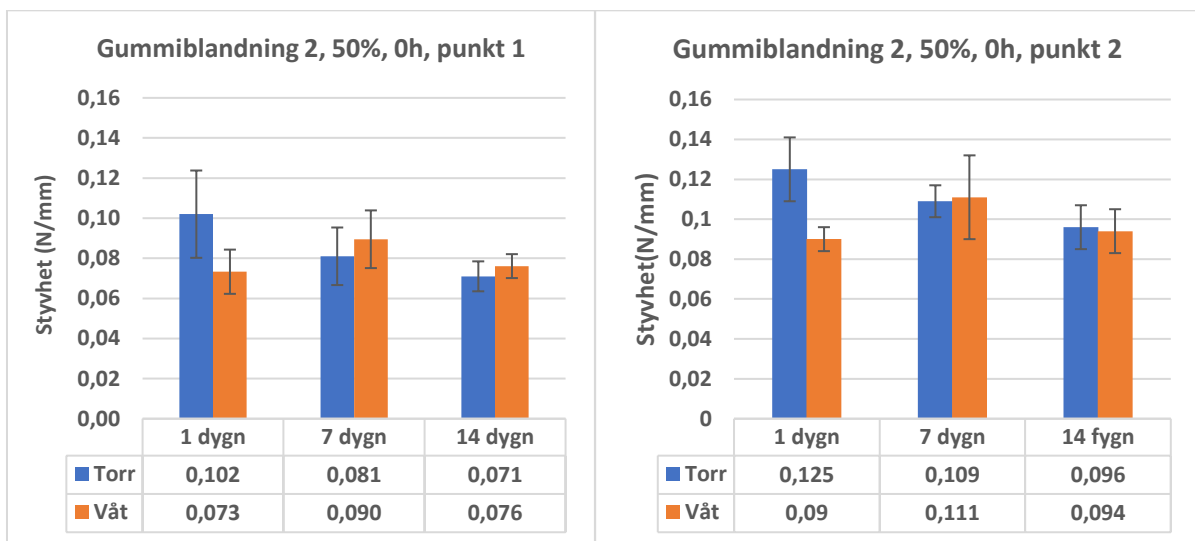
<b>Torr</b>	<b>Kropp</b>	<b>Kraft (N)</b>	<b>Korrigerig</b>	<b>Stabilitet (N)</b>	<b>Töjning (mm)</b>	<b>Styvhet (N/mm)</b>	<b>Diameter (mm)</b>	<b>Höjd (mm)</b>
1 Dygn	1	2,092	0,450	0,941	8,638	0,109	103	97
	2	1,911	0,433	0,827	9,149	0,090	101	99
	3	1,518	0,417	0,632	9,992	0,063	101	101
Medel						0,088		
STDEV						0,023		
7 Dygn	1	1,863	0,450	0,838	8,908	0,094	100	97
	2	1,788	0,450	0,804	7,792	0,103	101	97
	3	-	-	-	-	-	-	-
Medel						0,099		
STDEV						0,006		
14 Dygn	1	2,116	0,441	0,933	10,418	0,090	100	98
	2	1,637	0,441	0,722	9,861	0,073	101	98
	3	2,038	0,425	0,865	9,889	0,087	100	100
Medel						0,083		
STDEV						0,009		
<b>Våt</b>	<b>Kropp</b>	<b>Kraft (N)</b>	<b>Korrigerig</b>	<b>Stabilitet (N)</b>	<b>Töjning (mm)</b>	<b>Styvhet (N/mm)</b>	<b>Diameter (mm)</b>	<b>Höjd (mm)</b>
1 Dygn	1	2,604	0,450	1,171	8,151	0,144	101	97
	2	2,083	0,394	0,821	8,064	0,102	103	104
	3	1,937	0,409	0,792	8,024	0,099	101	102
Medel						0,115		
STDEV						0,025		
7 Dygn	1	1,75	0,425	0,743	7,525	0,099	100	100
	2	1,595	0,401	0,640	9,075	0,071	100	103
	3	2,024	0,417	0,843	9,549	0,088	100	101
Medel						0,086		
STDEV						0,014		
14 Dygn	1	1,595	0,468	0,746	10,037	0,074	100	95
	2	1,833	0,441	0,809	8,789	0,092	100	98
	3	1,675	0,409	0,685	7,762	0,088	100	102
Medel						0,085		
STDEV						0,009		

## Bilaga 6: Jämförelse mellan gummiblandning i punkt 1 respektive 2.

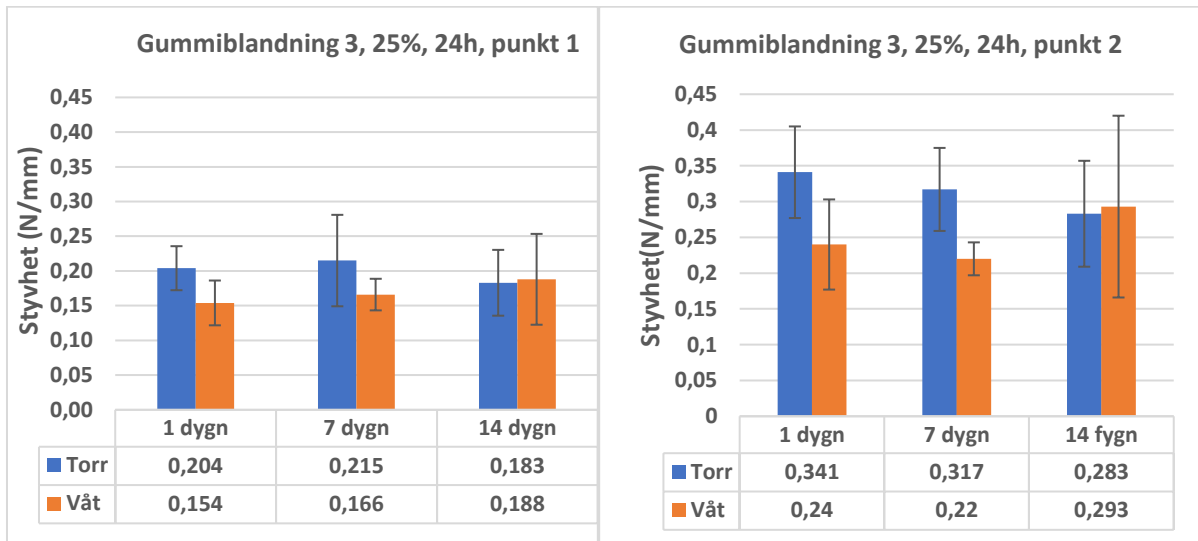
För gummiblandning 1: 25%\_0h.



För gummiblandning 2: 50%\_0h.



För gummiblandning 3: 25%\_24h.



För gummiblandning 4: 50%\_0h.

