

Thesis 2021-362-5329

Återvunna material i obundna lager i vägöverbyggnader

En studie av bärighet, stabilitet och klimatpåverkan för
betongkross och asfaltgranulat

Ludwig Winberg

Trafik och Väg
Institutionen för Teknik och Samhälle
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet



Copyright © Ludwig Winberg

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5329)/1-105/2021
ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet
Lund 2021

Examensarbete

CODEN: LUTVDG/(TVTT-5329)/1-105/2021

Thesis / Lunds Tekniska Högskola,
Institutionen för Teknik och samhälle,
Trafik och väg, 362

ISSN 1653-1922

Author(s): Ludwig Winberg
Title: Återvunna material i obundna lager i vägöverbyggnader
English title: Recycled materials in the unbound layers of the pavement
Language: Svenska
Year: 2021
Keywords: Vägbyggnad, återvunna material, obundna lager, betongkross, asfaltgranulat, bärighet, stabilitet, klimat- och miljöpåverkan
Citation: Ludwig Winberg, Återvunna material i obundna lager i vägöverbyggnader. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg, 2021. Thesis. 362

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

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

Innehåll

Förord	4
Sammanfattning	5
Abstract	6
Begrepp och förkortningar	7
1. Inledning	8
1.1. Bakgrund	8
1.2. Syfte	10
1.3. Frågeställningar	10
1.4. Begränsningar	10
2. Metod	11
2.1. Litteraturstudie	11
2.2. Praktiska försök i fält	12
2.2.1. Statisk plattbelastning	13
2.3. Platsbesök ÅGAB Syd AB	15
3. Teori	16
3.1. Vägbyggnad idag	16
3.1.1. Material	17
3.1.2. Bärighet	17
3.1.3. Stabilitet	19
3.1.4. Regelverk och krav	19
3.2. Krossad betong	25
3.2.1. Egenskaper	25
3.2.2. Användning	27
3.2.3. Klimat- och miljöpåverkan	28
3.2.4. Exempel på tidigare försök/studier	29
3.3. Asfaltgranulat	30
3.3.1. Egenskaper	31
3.3.2. Användning	32
3.3.3. Klimat- och miljöpåverkan	33
3.3.4. Exempel på tidigare försök/studier	34
3.4. Platsbesök ÅGAB Syd AB	35

3.5. Återvunna material utomlands	37
3.6. Andra återvunna material	37
3.6.1. Masugnsslagg/hyttsten	37
3.6.2. Slagg	38
3.6.3. Skumglas	39
3.6.4. Flygaska	39
4. Praktiska undersökningar	41
5. Resultat	44
5.1. Krossad betong	45
5.1.1. Bärighet	45
5.1.2. Bärighetskvot	45
5.1.3. Tre veckor efter utläggning	46
5.2. Asfaltgranulat	48
5.2.1. Bärighet	48
5.2.2. Bärighetskvot	48
5.2.3. Tre veckor efter utläggning	49
5.3. Bergkross	51
5.3.1 Bärighet	51
5.3.2. Bärighetskvot	51
5.4. Jämförelse mellan provytorna	53
5.4.1. Bärighet	53
5.4.2. Bärighetskvot	56
5.4.3. Tre veckor efter utläggning	57
6. Diskussion	60
6.1. Resultatdiskussion	60
6.1.1. Resultat vid utläggning	60
6.1.2. Resultat tre veckor efter utläggning	61
6.2. Krossad betong	62
6.2.1. Bärighet	62
6.2.2. Stabilitet	63
6.2.3. Klimat- och miljöpåverkan	63
6.2.4. Slutdiskussion för betongkross	64
6.3. Asfaltgranulat	64
6.3.1. Bärighet	64

6.3.2. Stabilitet	65
6.3.3. Klimat- och miljöpåverkan	65
6.3.4. Slutdiskussion för asfaltgranulat	65
6.4. Andra material	66
6.5. Metoddiskussion och felkällor	67
7. Slutsatser	69
8. Förslag på framtida studier	70
9. Referenser	71
Bilaga 1. Intervjufrågor ÅGAB Syd AB	77
Bilaga 2. Mätresultat plattbelastning	78

Förord

Detta examensarbete utgör den sista delen av min utbildning på civilingenjörsprogrammet inom Väg- och vattenbyggnad på Lunds tekniska högskola. Arbetet motsvarar 30 högskolepoäng och är skrivet på institutionen för Teknik och samhälle, på avdelningen Trafik och väg. Arbetet är gjort i samarbete med Skanska väg och anläggning syd.

För detta arbete vill jag först och främst tacka mina fantastiska handledare, Joacim Lundberg från institutionen och Petra Mani från Skanska, som under arbetets gång har bidragit med värdefulla kommentarer, intressanta synvinklar, glada tillrop och god styrning när jag har varit på väg åt fel håll (eller inte varit på väg åt något håll alls). Utan er hjälp hade det här aldrig gått, så stort tack till er! Jag vill även rikta ett stort tack till Jimmy Jönsson, arbetsledare på Skanska, som har varit till stor hjälp vid samordnandet av mina fältförsök.

Under arbetets gång har jag stött på många otroligt hjälpsamma personer från Skanska, ÅGAB Syd, Naturvårdsverket med mera som har hjälpt till och svarat på alla möjliga frågor via mail, telefonsamtal och intervjuer. Till alla er vill jag också rikta ett stort tack. Ingen nämnd, ingen glömd!

Jag vill också tacka min pluggkompis Gustaf, skrivandet av detta arbete hade inte varit detsamma utan våra trevliga luncher, klockan tre-fikor och kortspelade under långa pluggdagar. Även min flickvän Ellen förtjänar ett stort tack, för ditt outtröttliga stöd och din förmåga att lyfta mig under arbetets motivationssvackor. Min familj, som alltid stöttat och funnits där, både innan och under exjobb, ska också ha ett stort tack!

Detta arbete innebär slutet av min utbildning i Lund, och därför vill jag även ta tillfället i akt att tacka alla underbara människor jag har fått äran att lära känna under dessa fem år, och som har varit med och bidragit till den absolut roligaste perioden i mitt liv (hittills)! Stort tack till er!

Ludwig Winberg, Lund, juni 2021

Sammanfattning

I en bransch som i allt större utsträckning präglas av hållbarhet och miljö, blir det allt viktigare att hitta sätt att återvinna och återanvända snarare än att nyproducera. Ett exempel på detta är när det kommer till de obundna lagren, bär- och förstärkningslager i vägöverbyggnaden. Till dessa används traditionellt bergkross och naturgrus, som bryts från bergtäkter. Dessa material är inte oändliga, och är dessutom viktiga exempelvis för rening av grundvatten, varför det är intressant att istället titta på återvunna material som kan ersätta dem. Två sådana material är betongkross och asfaltgranulat, och detta arbete syftar att undersöka hur dessa material står sig gentemot bergkross när det kommer till bärighet, stabilitet och klimat- och miljöpåverkan. Arbetet undersöker även vilka andra återvunna material som finns tillgängliga till detta ändamål idag. Från detta syfte har följande frågeställningar tagits fram:

- Hur påverkas vägens bärighet med avseende på packningsgrad med återvunna material i överbyggnadens obundna lager jämfört med referensfallet?
- Hur påverkas vägens stabilitet med avseende på packningsgrad med återvunna material i överbyggnadens obundna lager jämfört med referensfallet?
- Vilken klimat- och miljöbesparing kan göras när man bygger med dessa material?
- Finns det andra återvunna material än betongkross/asfaltgranulat som skulle kunna användas?

Metoden som används för att undersöka detta är en litteraturstudie för grundläggande kunskap om vägbyggnad idag, om materialens egenskaper och klimatpåverkan, samt för att se vad tidigare forskning har kommit fram till inom ämnet. Utöver detta genomförs även ett fältförsök, där tre vägöverbyggnader bestående av olika material testas med statisk plattbelastning för att undersöka de olika lagrens bärighet och packningsgrad.

Resultatet visar att både betongkross och asfaltgranulat har klart jämförbara bärighetsegenskaper som bergkross, enligt litteraturen är den till och med bättre för de återvunna materialen i många fall, men detta visades inte så tydligt i fältundersökningarna. När det kommer till stabilitet har betongkross liknande egenskaper som bergkross, men endast upp till påkänningar på 1,2 MPa, därefter visar materialet tendenser på nedkrossning. För asfaltgranulat är stabiliteten sämre, men den kan förbättras något genom inblandning av andra material eller genom att lagret trafikeras minst två veckor innan ovanliggande asfaltlager läggs på. Av litteraturen framgår att både betongkross och asfaltgranulat har en efterbindande effekt, som gör att materialet binder ihop med tiden och därmed får en ökad bärighet och stabilitet över tid. Detta kunde dock inte testas i fältförsöken.

Miljö- och klimatpåverkan från de återvunna materialen är positiv jämfört med användningen av bergkross, eftersom det innebär att inget nytt material behöver brytas och ändliga resurser sparas. Det finns även potential att spara in på transporter genom användningen av återvunnet material. Materialen i sig har ingen nämnvärd negativ påverkan på klimat och miljö genom till exempel urlakning och utsläpp.

Abstract

In an industry that is increasingly affected by sustainability and environmental matters, it is becoming more and more important to find ways to recycle and reuse materials rather than producing new materials. An example of this is when it comes to unbound pavement materials, such as the base and subbase layers. For these layers, mineral aggregate and natural gravel is traditionally used, which are obtained through quarrying. These materials are not infinite, and they are also important to help with purification of groundwater. Therefore, it is interesting to look for recycled materials that could replace them. Two such materials are crushed concrete and crushed asphalt, and this report aims to examine how these materials compare to mineral aggregate when it comes to bearing capacity, stability and impact on climate and environment. The report also examines which other recycled materials are available for this purpose. Based on this aim, the following questions are asked:

- How is the bearing capacity affected with respect to degree of compaction with recycled materials in the unbound layers, compared to the reference case?
- How is the stability affected with respect to degree of compaction with recycled materials in the unbound layers, compared to the reference case?
- What savings of the climate and environment can be made with the use of these materials?
- Are there any other recycled materials that can be used?

The method used to examine this is a literature study, to gain basic knowledge about road construction today, about the attributes of the materials, and also to find out what previous research on the subject has concluded. This is combined with a practical experiment, where three pavement structures consisting of different materials are tested with static plate load test, to examine the bearing capacity and degree of compaction of the different layers.

The results show that both crushed concrete and crushed asphalt are comparable to mineral aggregates when it comes to bearing capacity. According to the literature the bearing capacity might even be better for the recycled materials in many cases, however this was not shown in the practical experiment. When it comes to stability, crushed concrete has similar attributes as mineral aggregate, but only until the load exceeds 1,2 MPa. After that, the material shows a tendency of crushing. For crushed asphalt, the stability is worse, but it could be improved by mixing more mineral aggregate in the material, or by allowing traffic on the layer for at least two weeks before the layers above are applied. The literature states that both crushed concrete and crushed asphalt has a binding effect, which makes the layer bind together over time, causing increased bearing capacity and stability. This was not possible to show with the practical experiment.

The recycled materials' impact on the climate and environment is positive compared to the mineral aggregates, since no quarrying is needed for new material, which means that finite resources are saved. There is also potential to decrease transports by using recycled materials. The materials themselves has no negative impact on the climate and environment worth mentioning through for instance leaching or emissions.

Begrepp och förkortningar

ATB VÄG – Allmän teknisk beskrivning innehållande Trafikverkets krav för vägbyggnad

Bergtäkt – Plats där bergmaterial bryts och utvinns

CFC – Klorfluorkarboner

DK – Dimensioneringsklass

PAH – Polycykliska aromatiska kolväten

PCB – Polyklorerade bifenyler

ÅDT – Årsdygnstrafik

1. Inledning

Detta arbete handlar om återvunna material i de obundna lagren (bär- och förstärkningslager) i vägöverbyggnader, och behandlar främst materialen betongkross och asfaltgranulat. Materialen undersöks utifrån bärighets- och stabilitetsegenskaper, samt vilken klimat- och miljöbesparing som kan göras genom användningen av dem. I detta inledande kapitel presenteras kort bakgrundsfakta samt varför och för vem detta arbete skulle kunna vara av intresse. Här presenteras även arbetets syfte, frågeställningar och begränsningar.

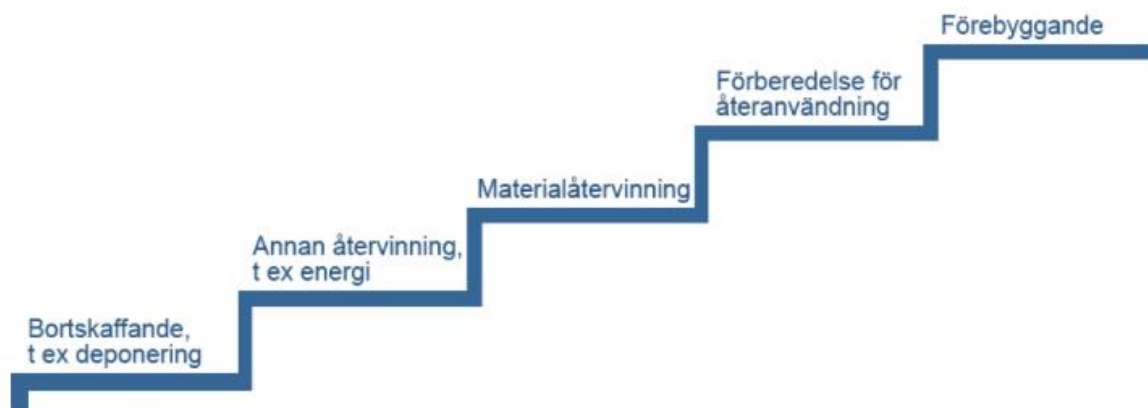
1.1. Bakgrund

Miljö och hållbarhet är ett ständigt aktuellt ämne inom byggnadsbranschen, och att hitta nya sätt att bygga mer miljövänligt och hållbart är alltid viktigt. I Sverige finns idag över 600 000 km bilväg (Trafikverket, 2020), och med en så stor produktionsvolym blir miljöfaktorn allt viktigare. År 2019 producerades strax över 100 miljoner ton ballast, främst bestående av bergkross och naturgrus. Ballasten används till exempel för betongproduktion eller fyllnadsmaterial men den största delen, drygt 56 %, används till vägbyggnad (SGU, 2020). Användandet av naturgrus och krossat berg är problematiskt eftersom de är ändliga resurser samt att bergtäkter placeras allt längre ifrån byggplatser, vilket leder till ökade transporter (Jepsson & Nyberg, 2017; SGU, 2020). Användandet av naturgrus är dessutom inte i linje med Sveriges miljömål (Naturvårdsverket, 2021), där ett av etappmålen är att öka resurshushållningen i byggsektorn genom att öka återvinning och återanvändning. Ett annat mål handlar om grundvatten av hög kvalitet, där naturgrus spelar en väldigt viktig roll i lagringen av grundvatten (Naturvårdsverket, 2020a). Naturgruset bidrar till filtrering av grundvatten, och ungefär hälften av allt dricksvatten som används i Sverige har filtrerats genom rullstensåsar bestående av naturgrus (Johansson, 2011). Därför bör uttaget från dessa minska. Förutom att bergkross är en ändlig resurs som kan leda till stora transportkostnader om det inte finns en bergtäkt i nära anslutning till det aktuella projektet, kan även bergtäkterna i sig ha en negativ påverkan på miljön. Påverkan från täkterna varierar från fall till fall beroende på typ av täkt och geografisk placering, men generellt sett påverkar bergtäkter miljön på följande sätt (Miljösamverkan Västra Götaland, 2011):

- Bergtäkter kan innebära stora ingrepp i naturen, vilket kan påverka djur och växter i området samt den övergripliga landskapsbilden.
- Arbete i bergtäkter kan leda till buller och vibrationer som kan störa både djur och människor, exempelvis vid borrhning, sprängning och krossning.
- Sprängning kan också bidra till vibrationer i mark, vilket kan leda till vibrationer och egensvängningar i byggnader i närområdet.
- Arbete i bergtäkter genererar utsläpp i form av damm och partiklar från brytning och arbetsfordon, fordons- och maskinavgaser och kväveoxid från sprängningar.
- Etableringen av täkten kan leda till en grundvattensänkning i täkten och i dess närområde, något som kan påverka vattentillgången i omgivande brunnar.
- Vatten och mark i täkten kan förorenas av till exempel oljespill eller andra föroreningsämnen från arbetet.

Något positivt med bergtäkter är dock att de kan få nya användningsområden när täkten avvecklats. Exempelvis kan täktverksamheten bidra till nya förutsättningar som gynnar den biologiska mångfalden i området (Enetjärn natur AB, 2015) eller så kan lagerföljder studeras i en brant som skapas på grund av täktverksamheten (Miljösamverkan Sverige et al., 2006). Det kan även bli ett uppskattat utflyktsmål, som Dalby stenbrott i Skåne som idag är en populär badplats.

Med tanke på den inverkan som brytning av nytt material har finns ett intresse av att återvinna befintliga material istället. Återvunna material har fördelar klimat- och miljömässigt, eftersom de sparar på jordens naturliga resurser och kan även leda till minskade transporter av material i de fall återvinningen kan ske nära byggplatsen (Trafikverket, 2013c). Det bidrar också till omställningen mot en cirkulär ekonomi, där återvinning och återanvändning är en central del för att minska mängden avfall (Naturskyddsföreningen, u.å.). I EU:s avfallshierarki, även kallat avfallstrappan (se figur 1) framgår det att mängden avfall som går till deponi ska minskas så mycket som möjligt till förmån för återvinning och återanvändning (Naturvårdsverket, 2020b). Den minskade mängden avfall som går till deponi är positivt då det sparar plats och landanvändning, samtidigt som det på flera håll i Sverige är svårt att hitta lämpliga platser för att ha deponi på (Knutz, 1999).



Figur 1. EU:s avfallstrappa, som visar prioriteringsordningen för hantering av avfall Källa: (Naturvårdsverket, 2020b).

Återvunna material kan även ha nackdelar, där det i vissa fall tvärtom kan öka transporterna ifall materialet inte kan återvinnas i nära anslutning där det erhålls (Jepsson & Nyberg, 2017). Dessutom finns det materialegenskaper hos både betong och asfalt som gör dem mindre användbara i vissa fall (till exempel betongens risk för nedkrossning), vilket kommer förklaras närmare i kapitel 3.2 och 3.3. Sedan avfallsskatten infördes år 2000 för att minska mängden avfall som går till deponi har intresset för återvinning och minskat avfall ökat hos företag (Jacobson, 2002b). Att kunna använda mer återvunna material och därmed mindre ändliga naturmaterial i vägbyggnad skulle kunna vara ett steg i rätt riktning mot att uppfylla Sveriges miljömål, och även kunna leda till större ekonomiska besparingar.

Återvunnet material kan alltså ha miljömässiga fördelar, men det behöver även ha tillräckliga egenskaper för att uppfylla de krav och regelverk som Trafikverket har för obundna lager i överbyggnad idag som finns beskrivna i kapitel 3.1.4. Därför är det av

intresse att undersöka hur egenskaperna i vägöverbyggnader med återvunna material i de obundna lagren står sig jämfört med traditionella överbyggnader med traditionella material. Två återvunna material som har använts en del i obundna lager, och som dessutom finns i stora mängder för återvinning, är betongkross och asfaltgranulat (Trafikverket, 2013c). Betongkross kan delas upp i rivningsbetong (från rivna byggnader) och restbetong (rester från produktion), och i Sverige genereras det årligen ungefär 40 000 ton restbetong och upp till 3 miljoner ton rivningsbetong (Vägverket, 2007). Betongkross som material kommer beskrivas närmare i kapitel 3.2. Asfaltgranulat kommer från rivning av vägar, och mängden fräst och uppgrävd asfalt låg i början av 2000-talet på ungefär 1,5–2 miljoner ton/år (Jacobson, 2004), siffror som även har bekräftats 2018 (Skanska, 2018). Asfaltgranulat som material kommer beskrivas närmare i kapitel 3.3. Dessa två alternativ är intressanta att undersöka vidare för att se hur överbyggnadens bärighet och stabilitet påverkas av dessa material, samt om de lever upp till Trafikverkets krav för dessa egenskaper. Dessa krav beskrivs närmare i kapitel 3.1.4.

1.2. Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka om det går att använda de återvunna materialen betongkross och asfaltgranulat i vägöverbyggnader utan att det ger negativ inverkan på bärighet och stabilitet. Arbetet syftar även till att undersöka klimat- och miljöpåverkan av ett sådant materialval. Detta görs för att undersöka vilka konsekvenser det ger att bygga med dessa material. Slutligen undersöks även om det finns andra återvunna material som skulle passa bra för ändamålet.

1.3. Frågeställningar

De frågeställningar som studien främst ämnar besvara är följande:

- Hur påverkas vägens bärighet med avseende på packningsgrad med återvunna material i överbyggnadens obundna lager jämfört med referensfallet?
- Hur påverkas vägens stabilitet med avseende på packningsgrad med återvunna material i överbyggnadens obundna lager jämfört med referensfallet?
- Vilken klimat- och miljöbesparing kan göras när man bygger med dessa material?
- Finns det andra återvunna material än betongkross/asfaltgranulat som skulle kunna användas?

1.4. Begränsningar

Arbetet har även en del begränsningar:

- Materialen testas endast på lågtrafikerad, temporär väg.
- Endast bärighet, stabilitet och klimat- och miljöpåverkan undersöks, även om det finns fler egenskaper som avgör hur lämpligt ett material är.
- Kemiska aspekter bakom testning av återvunna material tas inte upp.
- Endast betongkross och asfaltgranulat testas praktiskt.
- Långsiktiga effekter på bärighet testas inte i fält, utan tester sker endast i nära anslutning till utläggning.

2. Metod

I arbetet används flera metoder vilket inkluderar litteraturstudie, praktiska försök i fält och platsbesök med intervju. Dessa metoder presenteras närmare nedan.

2.1. Litteraturstudie

En litteraturstudie utförs för att undersöka hur vägbyggnad normalt sker idag och vilka krav och regelverk som finns, främst gällande bärrighet och stabilitet. Litteraturstudien behandlar användandet av betongkross och asfaltgranulat, där materialegenskaper, användningsområden och tidigare försök och erfarenheter undersöks. Slutligen innehåller studien också teori om klimatpåverkan och hållbarhet när det byggs med återvunna material.

Litteraturen som används består av tidigare examensarbeten, vetenskapliga rapporter, vetenskapliga artiklar och dokument från Trafikverket som behandlar råd, krav och regler kring obundna lager. I april 2021 ersatte Trafikverket gamla krav- och råddokument med det nya dokumentet TRV Infra. Eftersom majoriteten av litteraturstudien utfördes innan detta har de gamla dokumenten använts till större del.

Databaser som används vid litteratursökning är:

- LUP Student papers
- LUBcat – Lunds universitets Bibliotek
- LUBsearch
- Directory of Open Access Journals (DOAJ)
- Libris
- DiVA – Digitala Vetenskapliga Arkivet
- VTI DiVA
- Trafikverkets dokument
- International Journal of Pavement Engineering – Taylor & Francis online
- Road Materials and Pavement design - Taylor & Francis online
- Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board – Sage Journals
- TRB Publications Index
- Science Direct
- Google Scholar
- Google

Sökorden som främst används är:

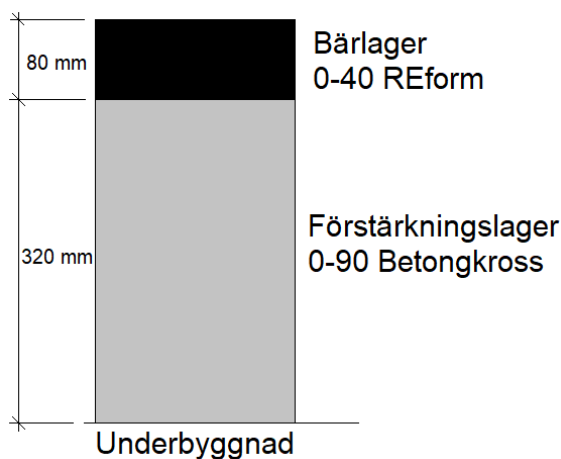
- Svenska: *alternativa vägbyggnadsmaterial, återvunna vägbyggnadsmaterial, återvunnen betong/asfalt, krossad betong, asfaltgranulat och obundna lager.*
- Engelska: *Alternative materials in roads, recycled concrete unbound materials, recycled asphalt unbound materials, recycled pavement materials, recycled base layer, recycled sub-base layer, Residual material usage in roads.*

2.2. Praktiska försök i fält

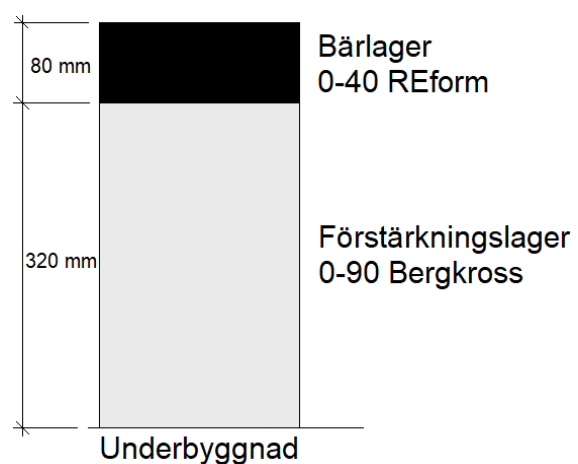
Fältförsök utförs som ett komplement till litteraturstudien för att undersöka effekterna på bärighet i praktiken. Fördelen med detta är att de olika materialen kan testas under liknande förhållanden och att utvärderingen av resultaten blir bredare när både teori och fältundersökningar kan kopplas ihop. Fältundersökningar kan därtill bidra med ny kunskap som inte finns eller inte har hittats i litteraturen.

Försöken görs i samband med markentreprenaden inför ett radhusbygge av Skanska i Malmö. På arbetsplatsen byggs en provisorisk väg för arbetsfordon, vilken används för tester i studien. I bärlagret på provvägen används materialet REform, som är ett material framtaget av Skanska bestående av traditionellt bergkross med inblandning av 30 vikt-% krossad asfalt (Skanska, u.å.). Vägen delas upp i två delar enligt nedan och visas även i figur 2 och 3 (observera att 0–90 och 0–40 innebär att kornstorlekarna varierar från 0 mm till 90/40 mm):

- En del med krossad betong i överbyggnaden. Nedifrån och upp består den av 320 mm krossat förstärkningslager med 0–90 betongkross och 80 mm obundet bärlager med 0–40 REform. Anledningen till att betongkross inte används i bärlagret är att betongkross i storleken 0–40 inte fanns att tillgå. Denna yta refereras senare i texten som *betongkrossytan*.
- En del med asfaltgranulat i överbyggnaden. Nedifrån och upp består den av 320 mm krossat förstärkningslager med 0–90 bergkross och 80 mm obundet bärlager med 0–40 REform. Anledningen till att asfaltgranulat inte används i förstärkningslagret är att asfaltgranulat i storleken 0–90 inte fanns att tillgå. Denna yta refereras senare i texten som *asfaltgranulatytan*.

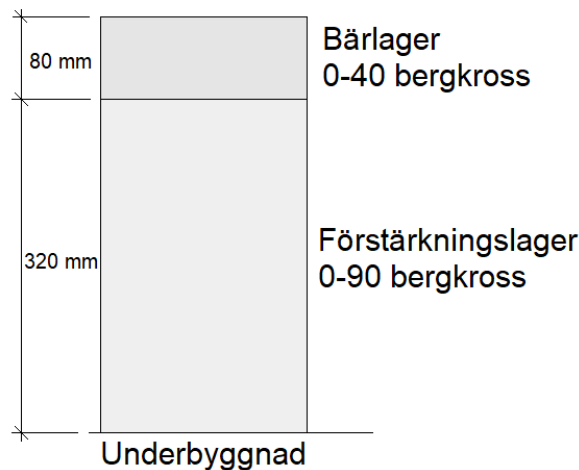


Figur 2. Uppbyggnad av provytan med betongkross.



Figur 3. Uppbyggnad av provytan med asfaltgranulat.

Det byggs även en yta med traditionellt bergkross som kommer att användas som referens att jämföra de två återvunna materialen med. Denna yta har en överbyggnad som nedifrån och upp består av ett 320 mm krossat förstärkningslager med bergkross 0–90 och 80 mm obundet bärlager med bergkross 0–40 (se figur 4). Refereras senare i texten som *bergkrossytan*.



Figur 4. Uppbyggnad av referensytan med bergkross.

Testmetoden som används är statisk plattbelastning, vilket beskrivs i avsnitt 2.2.1.

2.2.1. Statisk plattbelastning

Statisk plattbelastning används för att undersöka elasticitets- och deformationsegenskaper för obundna lager, och det är möjligt att ta reda på bärlighet såväl som packningsgrad. Vid tester med plattbelastare utförs två pålastningar, med en avlastning mellan dessa två. Sättningarna under dessa pålastningar registreras och resultaten som erhålls är ett diagram som redovisar sättningen som en funktion av trycket. Ur detta diagram fås deformationsmoduler (E_V) från de två pålastningarna samt en bärlighetskvot (E_{V2}/E_{V1}) som är ett indirekt mått på packningsgraden (Agardh & Parhamifar, 2014; Trafikverket, 2011b). Att bärlighetskvoten fungerar som ett indirekt mått på packningsgraden beror på att sättningen vid den första belastningen till stor del beror på att materialet packas ihop. Denna deformation går inte helt tillbaka under avlastningen och vid den andra belastningen är därför materialet mer packat, vilket leder till att sättningen blir mindre. En stor skillnad mellan deformationsmodulerna betyder därför att materialet skulle kunna packas bättre, medan en liten skillnad innebär att det redan är väl packat. En fördel med plattbelastningsmätningar är att resultatet direkt kan relateras till krav i ATB Väg, dock tar varje mätpunkt relativt lång tid, med en kapacitet på 1–2 mätpunkter i timmen. (Trafikverket, 2012).



Figur 5. Utrustning för statisk plattbelastning. Källa: Egen bild

2.2.1.1. Utrustning

Till försöket behövs följande:

- Belastningsmothåll – Ska väga minst 4,5 ton. Kan till exempel vara en lastbil, traktor eller vält. Avståndet från provytan till mothållets upplag (fordonsdäck eller liknande) ska vara minst 0,75 m.
- Utrustning med lastplatta ($\varnothing = 300$ mm), tryckutrustning med oljepump, hydraulpress och högtrycksslang.
- Anordning för mätningar av sättning och kraft.
- Beräkningsenhet för beräkning av resultat.
- Fin sand för utjämning av provyta.

2.2.1.2. Utförande

Försöket förbereds genom att en provyta motsvarande lastplattans area jämnas ut med fin sand för att hela lastplattans yta ska ligga an mot provytan. Efter att utrustningen installerats och kalibrerats kan mätningarna inledas.

1. En förbelastning på $0,01 \text{ MN/m}^2$ utförs under 30 sekunder. Efter detta nollställs mätaren.
2. Belastningen ökas sedan till $0,08 \text{ MN/m}^2$, där sättningen registreras efter två minuter.
3. Belastningen ökas sedan till $0,16 \text{ MN/m}^2$, där sättningen registreras efter en minut.
4. Steg 3 upprepas för belastningarna $0,24 \text{ MN/m}^2$, $0,32 \text{ MN/m}^2$, $0,40 \text{ MN/m}^2$, $0,45 \text{ MN/m}^2$ samt 50 MN/m^2 . Om sättningen överstiger 5 mm ska pålastningen avbrytas även om maxlasten 50 MN/m^2 ännu inte nåtts.
5. Efter att högsta lasten har nåtts (antingen 50 MN/m^2 eller lasten då sättningen når 5 mm) ska en avlastning utföras i tre steg: 50 %, 25 % och 0 % av maxlasten. Även här ska varje steg pågå i en minut.

6. Efter avlastningen upprepas steg 2–4, med undantaget att pålastningen avslutas vid $0,45 \text{ MN/m}^2$ (eller 90 % av den högsta lasten ifall pålastningen avslutades tidigare).
7. Efter detta erhålls ett diagram med tryck-sättningssamband, samt värden på deformationsmodulerna E_{V1} och E_{V2} (1 och 2 står för första respektive andra pålastningen). Med dessa kan bärighetskvoten E_{V2}/E_{V1} beräknas.
8. E_{V1} och E_{V2} beräknas genom att ett andragradspolynom anpassas till mätpunkterna:

$$s = a_0 + a_1\sigma_0 + a_2\sigma_0^2$$

där s är sättningen i mm, σ_0 är medelnormalspänningen under lastplattan i MPa och a_0 , a_1 och a_2 är konstanter som bestäms genom kurvanpassning. Med hjälp av konstanterna beräknas E_{V1} och E_{V2} genom följande formel:

$$E_V = 1,5 \times r \times \frac{1}{a_1 + a_2\sigma_{max}}$$

där r är belastningsplattans radie i mm och σ_{max} är den första belastningens maximala medelnormalspänning i MPa.

2.3. Platsbesök ÅGAB Syd AB

I studien utförs ett platsbesök på ÅGAB (Återvinning Grus Asfalt Betong) Syd AB:s huvudanläggning i Skabersjö i sydvästra Skåne. ÅGAB är en leverantör av bland annat återvunnet material som kan komma att vara aktuella i detta projekt. På ÅGAB utförs intervjuer av VD Johan Nilsson och miljöchef Eva Silfverberg, samt en guidad rundvandring på anläggningen.

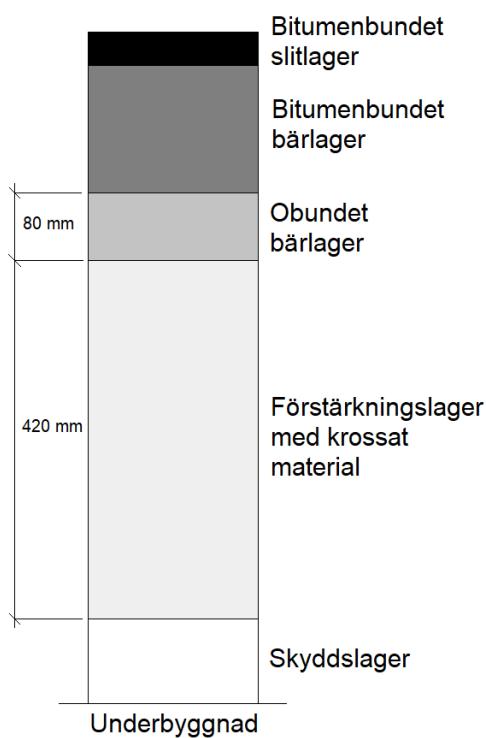
3. Teori

I detta avsnitt behandlas teori om vägbyggnad idag med avseende på överbyggnadslager, material och regelverk. Det går även djupare in på krossad betong och asfaltgranulat och dess egenskaper och användning i obundna lager i överbyggnader. Slutligen tas användningen av dessa material utomlands upp, samt andra återvunna material i obundna lager.

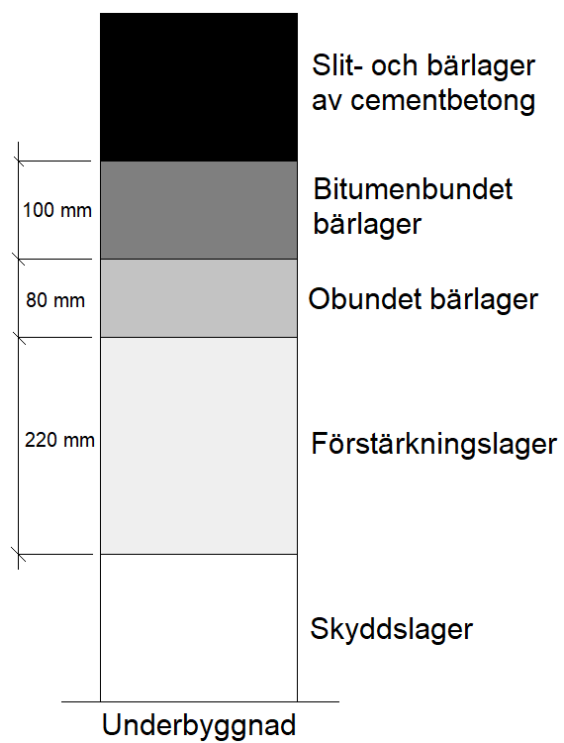
3.1. Vägbyggnad idag

Sverige består idag av över 600 000 km bilväg som varierar mellan statliga och kommunala vägar, samt enskilda vägar med eller utan statsbidrag (Trafikverket, 2020). Hur dessa vägar byggs varierar beroende på trafikmängd, hastighet, andel tunga fordon, klimat o.s.v., vilket gör att det inte finns någon enskild mall för hur en väg ska se ut.

Det finns tre olika huvudtyper av överbyggnader, flexibel, styv eller halvstyv överbyggnad (Agardh & Parhamifar, 2014). En flexibel överbyggnad är den i Sverige vanligaste sorten, och innebär att överbyggnaden endast består av obundna och bitumenbundna lager. I en styv överbyggnad är minst ett av lagren hydrauliskt bundet (Trafikverket, 2021) och det viktigaste lastfördelande lagret består av cementbetong (Agardh & Parhamifar, 2014). Halvstyv överbyggnad kan beskrivas som en kombination av flexibel och styv, exempelvis med asfalt belagd på ett cementbundet bärlager (Wiman & Tholén, u.å.). Styva överbyggnader har ofta en längre livslängd än flexibla, men också högre investeringskostnader (Kandiel, 2017). Exempel på hur en flexibel och en styv överbyggnad kan vara uppbyggda visas i figur 6 och 7.



Figur 6. Exempel på en flexibel överbyggnad.
Källa: (Trafikverket, 2021)



Figur 7. Exempel på en styv överbyggnad.
Källa: (Trafikverket, 2021)

De obundna lagren i en flexibel överbyggnad är, nedifrån och upp, skyddslager, förstärkningslager och obundet bärlager. Skyddslager används vid behov, som när det finns material i underbyggnaden som är tjälfarligt, eller när underbyggnadsmaterialet är finkornigt och vatten riskerar att tränga upp i överbyggnaden (Agardh & Parhamifar, 2014).

Förstärkningslagret har som uppgift att kunna fördela trafiklasten vidare över underbyggnaden. Det är även viktigt att förstärkningslagret är dränerande, för att vatten inte ska lagras i överbyggnaden. Packningsarbetet av stor vikt för slutresultatet hos lagret. Kornstorleken är relativt stor, med en största kornstorlek på 60–130 mm (Agardh & Parhamifar, 2014).

Bärlagret består traditionellt av grus eller sten och är även det till för att fördela trafiklasterna över de undre lagren. Materialet i bärlagret behöver ha goda hållfasthetsegenskaper, men även packningen av bärlagret och klimatet har stor inverkan på bärlagrets kvalitet. I bärlagret är kornstorleken mindre än för förstärkningslagret, med en största storlek på 30–40 mm. (Agardh & Parhamifar, 2014).

3.1.1. Material

Med traditionella material i obundna lager i överbyggnad menas naturgrus, krossat berg eller morän (Vägverket, 2007). Dessa material har i Sverige använts i vägars uppbyggnad sedan 1800-talet och är det vanligaste än idag (Ahlberg, 2016). Att dessa material använts i så stor utsträckning beror delvis på deras goda egenskaper för ändamålet, men även på grund av den stora svenska tillgången på dessa material, som i vissa fall har setts som oändlig i Sverige. I andra länder, som till exempel Nederländerna, finns inte samma tillgång på dessa material, vilket har lett till att utvecklingen och användandet av återvunna material har kommit längre där (Ydrevik & Arm, 2001).

En fördel med dessa material är att de är relativt enkla att framställa. För naturgrus behövs endast en grävmaskin som gräver ut materialet som sedan förs vidare för sortering och eventuell krossning (Johansson, 2011). För bergkross krävs lite mer arbete, med både borrhning och sprängning inblandat för att få loss materialet. Bergmaterialet kan sedan krossas på plats eller transporteras vidare till ett krossverk (Johansson, 2011).

Nackdelarna med att använda traditionella material är som tidigare nämnt att de inte är så oändliga som det tidigare antagits, och därmed bör användningen av jungfruligt material undvikas för att spara på jordens ändliga resurser. De är också viktiga för reningen av grundvattnet, en central del i Sveriges miljömål (Naturvårdsverket, 2020a). Materialet är inte heller alltid så lättillgängligt om täkterna ligger långt ifrån byggarbetsplatsen, vilket i så fall kan leda till långa och dyra transporter (SGU, 2020), vilket även påverkar utsläppen av partiklar och avgaser som följd.

3.1.2. Bärighet

Enligt Trafikverkets definition är bärighet den ”högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor eller deformationer” (Trafikverket, 2021, s. 11). Det är alltså den högsta lasten vägen klarar av utan att gå sönder. Nedbrytningen av vägar är dock mer komplicerad än så eftersom vägar inte går sönder av en maximal last, utan snarare bryts ned över tid. Det är inte heller bara materialet som

spelar roll för bärigheten, utan även andra faktorer som temperatur, fukt (Agardh & Parhamifar, 2014) och kornstorleksfördelning (Johansson, 2011). Bärighet mäts i Sverige vanligtvis med hjälp av statisk plattbelastning (Trafikverket, 2013c) och det är också utifrån de resultaten som Trafikverkets bärighetskrav är satta (se kapitel 3.1.4.). Bärigheten anges i MPa och deformationsmodulen E_{V2} som fås av plattbelastningsmätningar brukar indirekt ses som ett mått på detta (Trafikverket, 2011b).

3.1.2.1 Fallviktsmätning

Mätning av bärighet kan utföras med statisk plattbelastning, men ett annat alternativ är fallviktsmätningar. Försöket utförs genom att en vikt släpps och faller mot en lastplatta så att kraften överförs till vägytan. Därefter mäts nedsjunkningen av ytan som uppstår. Detta mäts på flera punkter på bestämda avstånd från lastplattans centrum, för att se hur deformationen sprider ut sig. Vid fallviktsmätningar blir resultatet en ytmodul, som enkelt beskrivet är ett medelvärde av elasticitetsmodulen för de underliggande materiallagren (Agardh & Parhamifar, 2014). Detta görs normalt med hjälp av ett fordon, vilket gör att tyngder upp till 50 kN kan släppas. Alternativet kallas lätt fallvikt och går i stora drag till på samma sätt, med skillnaden att fallvikten släpps manuellt istället för från ett fordon. Detta innebär att lasten blir mindre, med en maximal last på ungefär 14 kN (VTI, 2020) samt att lastpulsens (tiden då lasten verkar) blir kortare (Trafikverket, 2012). Fördelarna med denna metod är att kapaciteten är hög, d.v.s. många punkter kan mätas på kort tid, samt att utrustningen är smidig och enkel att använda på trånga områden där andra maskiner kan ha svårt att komma åt. Nackdelen är att Trafikverket i dagsläget inte har någon metodbeskrivning för lätt fallvikt, och den är svårare att relatera till Trafikverkets krav (Trafikverket, 2012).



Figur 8. Fallviktsmätning med fordon. Källa: (Trafikverket, 2012)



Figur 9. Lätt fallvikt. Källa: (Trafikverket, 2012)

I detta arbete utförs dock endast försök med statisk plattbelastning. Detta beror på att metodens resultat direkt kan relateras till Trafikverkets krav, vilket underlättar resultatanalysen och är bättre anpassat till arbetets frågeställningar. Jämfört med fallviktsmätningar erhålls dessutom en bärighetskvot, ett mått på packningsgraden, vilket också passar till frågeställningarna. Försök har dessutom visat att den dynamiska deformationsmodulen som fås av fallviktsförsök korrelerar väl med deformationsmodulen

Ev₂ (Kuttah, 2020), varför den inte anses ha tillräckligt mervärde för att användas i kombination med plattbelastningen i detta försök.

3.1.3. Stabilitet

Till skillnad från bärighet har stabilitet inte någon enhet som det mäts i, och därför inte heller några kravvärden som stabiliteten ska uppnå (Ydrevik, 2000). Ett materials stabilitet brukar istället beskrivas som dess kapacitet att stå emot permanenta deformationer (Ydrevik, 1999). Om ett material har bristande stabilitetsegenskaper innebär det att oönskade rörelser och omlagringar sker i materialet, vilket med tiden ger upphov till deformationer, ofta i form av spårbildning eller sprickor (Björkdahl & Jansson, 2001). Som tidigare nämnt har Trafikverket inte några specifika krav när det kommer till just bärighet, utan de beskriver det istället som att ”en beläggning med otillräcklig stabilitet i förhållande till aktuell trafik får spår beroende på att materialet omlagras” (Trafikverket, 2011c, s. 53).

3.1.4. Regelverk och krav

Förutom tillgänglighet och framställning av material krävs även att materialet uppfyller befintliga krav och regler så att vägen håller god kvalitet genom hela dess livslängd. Detta avsnitt handlar främst om regler och krav kring bärighet och packning, då det är dessa som är mest relevanta för arbetet, men även andra aspekter berörs. Kapitlet behandlar krav för en överbyggnad generellt, mer specifika krav för bär-, förstärkningslager och terrass (underbyggnadens yta) samt regler specifikt för användning av betongkross och asfaltgranulat. Kraven som redovisas gäller en flexibel konstruktion vid nybyggnad.

3.1.4.1. Överbyggnad

Vid dimensionering av en väg krävs beaktande av vilken typ av trafik som kommer att belasta vägen, det vill säga mängd, andel tunga fordon, etc. För att underlätta detta finns tre dimensioneringsklasser (DK) (Trafikverket, 2021):

- DK 1 – Används för lågtrafikerade vägar med max 500 000 standardaxlar under vägens livslängd. Vägar inom denna klass kan dimensioneras utifrån tabell- och indexmetoden enligt TRV Infra (Trafikverket, 2021).
- DK 2 – Denna dimensioneringsklass fungerar för alla olika vägar. Det är efter denna klass som Trafikverkets generella krav är satta. Dimensioneringen bygger på erfarenhet och tidigare försök och observationer.
- DK 3 – Mer avancerad dimensionering, när material och metoder används som inte ingår i DK 1 eller 2.

För en flexibel överbyggnad ska de obundna lagren ha en total tjocklek på 500 mm (Trafikverket, 2021). De ingående lagren i en överbyggnad bör för bästa resultat packas vid optimal vattenkvot, vilket är ”den vattenkvot vid vilken ett material får maximal torrdensitet vid laboratoriepackning” (Trafikverket, 2005, s. 6). Vattenkvoten mäts i viktprocent. Den optimala vattenkvoten bestäms enligt standard SS-EN 13286-2 (Trafikverket, 2005). Allmänna krav som finns på en överbyggnad är att den ska ha egenskaper som gör att den kan bibehålla sin hållfasthet under hela vägens livslängd. Det är dessutom viktigt att bär- och förstärkningslagret är dränerande för att överflödigt vatten ska kunna transporteras bort, samt har hög bärighet för att kunna stå emot plastiska

deformationer (Trafikverket, 2011a). Materialen som används ska vara rena och fria från föroreningar (Trafikverket, 2005), vara volymbeständiga och kunna motstå omvandling, till exempel på grund av vittring. Utöver detta ska de även accepteras med hänsyn till miljö och hälsa, samt vara problemfria när det kommer till återvinning och deponering (Trafikverket, 2011b).

Överbyggnadens bärlighet ska kontrolleras på två olika nivåer i överbyggnaden, dels på det obundna bärlagrets yta, dels på terrassytan. Undantag kan ske ifall underbyggnaden består av bergmaterial, då räcker det med en kontroll på det obundna bärlagret. Om terrassytan ligger mer än 750 mm under den obundna bärlagerytan, kan den andra kontrollen istället ske på en nivå 500 mm under den obundna bärlagerytan (Trafikverket, 2011a).

3.1.4.2. Bärlager

För bärlager finns flera olika krav på egenskaper som ska uppfyllas, så som krossytegrad, nötningsmotstånd, motstånd mot fragmentering, kornstorleksfördelning, packningsegenskaper, petrografi och organisk halt (Trafikverket, 2011b).

När det gäller bärlighet mäts den som tidigare beskrivet med statisk plattbelastning i enheten MPa. Kraven gäller för medelvärdet för samtliga provpunkter, och beroende på om fem eller åtta kontrollpunkter väljs för mätningarna varierar kraven, vilket framgår av tabell 1. Det finns även krav för bärlighetskvoten, som är ett indirekt mått på packningsgraden. Dessa krav gäller för varje enskild punkt, och är beroende av den uppmätta bärligheten i den punkten. Detta finns redovisat i tabell 2.

Tabell 1. Krav på bärlighet för bärlager. Standardavvikelsen betecknas med s . Källa: (Trafikverket, 2011b).

Antal kontrollpunkter (st)	Bärlighet E_{V2} (MPa)
8	$\geq 140 + 0,96 \times s$
5	$\geq 140 + 0,83 \times s$

Tabell 2. Krav på bärlighetskvot för bärlager (Trafikverket, 2011b).

Uppmätt bärlighet (MPa)	Bärlighetskvot E_{V2}/E_{V1}
≤ 140	$\leq 2,8$
> 140	$\leq 1 + 0,013 \times E_{V2}$

Packning av bärlager ska utföras med en vibrerande eller oscillerande vält, som ska köras med en låg och jämn hastighet på 2,5–4,0 km/h (Trafikverket, 2005). Riktmärke för packningsarbetet framgår av tabell 3.

Tabell 3. Maximal lagertjocklek på bärlager i mm beroende på linjelast, vattenkvot och antal vältöverfarer (Trafikverket, 2005).

Linjelast (kN/m)	Vattenkvot \geq optimal minus 1,5%		Vattenkvot $<$ optimal minus 1,5	
	6 överfarer	8 överfarer	6 överfarer	10 överfarer
> 15	80	150	-	100
> 25	200	250	100	130
> 35	250	300	120	150



Figur 10. Exempel på ett bärlager. Källa: Egen bild

3.1.4.3. Förstärkningslager

Även för förstärkningslagret finns flera olika krav på egenskaper som ska uppfyllas, så som krossytegrad, nötningsmotstånd, finmaterialkvalitet, organisk halt och kornstorleksfördelning (Trafikverket, 2011b).

För förstärkningslagret finns inga krav när det gäller bärlighet och bärlighetskvot. Istället finns det rekommendationer för att bärlagrets krav sedan ska kunna uppfyllas (Trafikverket, 2005). Dessa rekommendationer redovisas i tabell 4 och 5. Endast rekommendationer för krossat förstärkningslager finns med (det finns även rekommendationer för okrossat material), eftersom det är vad arbetet behandlar.

Tabell 4. Rekommendationer på bärlighet för förstärkningslager. Standardavvikelsen betecknas med s . (Trafikverket, 2005)

Antal kontrollpunkter (st)	Bärlighet E_{V2} (MPa)
8	$\geq 125 + 0,96 \times s$
5	$\geq 125 + 0,83 \times s$

Tabell 5. Rekommendationer på bärlighetskvot för förstärkningslager (Trafikverket, 2005)

Uppmätt bärlighet (MPa)	Bärlighetskvot E_{V2}/E_{V1}
≤ 125	$\leq 3,5$
> 125	$\leq 1 + 0,020 \times E_{V2}$

Även förstärkningslagret ska packas med en vibrerande eller oscillerande vält med samma hastighet, 2,5–4,0 km/h, som bärlagret. Packningen ska utföras enligt tabell 6.

Tabell 6. Maximal lagertjocklek på förstärkningslagerlager i mm beroende på linjelast, vattenkvot och antal vältöverfarter (Trafikverket, 2005)

Linjelast (kN/m)	Vattenkvot > 3,5 %		Vattenkvot < 3,5 % eller obestämmd	
	6 överfarter	8 överfarter	6 överfarter	10 överfarter
15	250	300	-	-
25	400	450	-	200
35	500	550	250	300
45	550	600	300	350
55	600	650	350	400



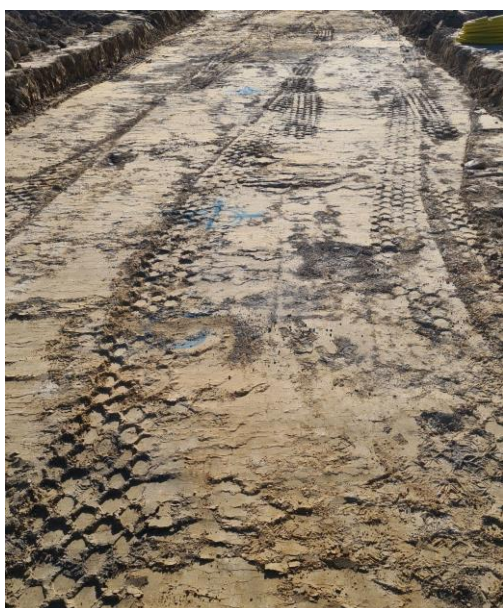
Figur 11. Exempel på ett förstärkningslager. Källa: Egen bild

3.1.4.4. Terrass

Terrassen är underbyggnadens yta, och har inte lika mycket krav som bär-och förstärkningslagret, men en del krav finns på exempelvis bärighet, lutning och föroreningsgrad. Bärighetskraven på terrassytan varierar beroende på hur djupt under den obundna bärlagerytan den ligger, ju längre ner desto lägre krav. De olika kravnivåerna framgår av tabell 7.

Tabell 7. Krav på bärlighet för terrass beroende på djup och antal kontrollpunkter. Standardavvikelsen betecknas med *s*. (Trafikverket, 2011b)

Djup under obundna bärlagrets yta (mm)	Antal kontrollpunkter (st)	Bärlighet E_{V2} (MPa)
500–550	8	$\geq 40 + 0,96 \times s$
	5	$\geq 40 + 0,83 \times s$
551–650	8	$\geq 30 + 0,96 \times s$
	5	$\geq 30 + 0,83 \times s$
651–750	8	$\geq 20 + 0,96 \times s$
	5	$\geq 20 + 0,83 \times s$



Figur 12. Exempel på en terrassyta. Källa: Egen bild

3.1.4.5. Krossad betong

Betongkross får inte användas i bärlager på bilvägar, utan endast på gång- och cykelvägar, vilket beror på materialets känslighet för saltinträngning och stora risken för nedkrossning om materialet placeras högt upp i överbyggnaden (Trafikverket, 2013c).

När betongkross används måste det separeras från farliga ämnen, som exempelvis polycykliska aromatiska kolväten (PAH), polyklorerade bifenyler (PCB), klorfluorkarboner (CFC), kvicksilver och asbest. Detta ska dessutom kunna bekräftas med hjälp av skriftliga intyg för att säkerställa att betongen är fri från dessa ämnen (Trafikverket, 2013a). För att säkerställa god kvalitet och att materialet inte är skadligt för miljön, är producenten av betongkross skyldig att deklarerera miljöpåverkan, kvalitetsklass, och kornstorleksfördelning för det levererade materialet (Trafikverket, 2013a).

Betongens kvalitet ska bekräftas genom antingen dokumentation av dess kvalitet eller genom provtryckning av provkroppar. Trafikverket har separata dokument för provningsmetoder av betong (Trafikverket, 2004).

Krossad betong delas in i fyra olika kvalitetsklasser, 1–4 där 1 är högst kvalitet. Indelningen görs med avseende på kvalitet, renhet och hållfasthet. Indelningen framgår av tabell 8 och 9. Betongkross som används i obundna lager måste tillhöra klass 1 eller 2. (Trafikverket, 2004).

Tabell 8. Indelning i kvalitetsklass för betong med avseende på hållfasthet (Trafikverket, 2004). C- och K-värde står för cylinder- respektive kubhållfasthet (Svensk betong, u.å.).

Kvalitetsklass	C-värde (MPa)	K-värde (MPa)	Tryckhållfasthet, kärna (MPa)	Styvhetsmodul (MPa)
1	≥30/37	≥40	≥30	450
2	≥20/25	≥25	≥20	450
3	≥12/15	≥12	≥10	250
4	-	-	-	150

Tabell 9. Indelning i kvalitetsklass för betong med avseende på renhet (Trafikverket, 2004)

Kvalitetsklass	Minsta betongmängd (%)	Högsta tegelmängd (%)	Högsta lättbetongmängd (%)	Högsta övrig mängd (%)
1	100	0	0	0
2	95	5	1	0,5
3	80	20	5	2
4	50	50	50	10

3.1.4.6. Asfaltgranulat

Asfaltgranulat kan användas i både bär- och förstärkningslager, men det ska inte användas på ytor med mycket statiska laster, som till exempel parkeringsplatser, eftersom det då finns risk för deformationer (Trafikverket, 2013a). Bindemedelshalten för asfaltgranulat i obundna lager ska ligga mellan 3–6 %. Om halten är högre ska det tillsättas mer ballast för att få ner bindemedelshalten innanför detta intervall (Trafikverket, 2013c). Hanteringen kräver extra åtgärder om asfalten innehåller tjära, då måste granulatet hanteras enligt Trafikverkets separata riktlinjer för detta (Trafikverket, 2013a). Kraven på materialets styvhetsmodul framgår av tabell 10.

Tabell 10. Krav på asfaltgranulatets styvhetsmodul i obundet material (Trafikverket, 2013a).

ÅDT (st)	Styvhetsmodul (MPa)
Gång- och cykelbana	500
<500	500
≥500	1000

Vid utläggning ska asfaltgranulat läggas i lager som är 80–150 mm tjocka. Om skikten behöver vara tjockare än så läggs asfaltgranulatet istället ut i flera lager. Packningen ska utföras med en tung, vibrerande vält. Vid stora vägar, där tunga fordon beräknas vara fler än 50 per dag, ska det utföras en provpackning för att avgöra lämplig vält och antal överfarer för att packningen ska bli godkänd (Trafikverket, 2013b).

3.2. Krossad betong

Detta avsnitt handlar om krossad betong och dess egenskaper som obundet material, hur det används i dagsläget, vilken klimat- och miljöpåverkan användandet kan innebära samt exempel på tidigare försök som utförts.



Figur 13. Krossad betong. Källa: (Miljöfabriken, u.å.)

Som tidigare nämnt finns det två olika grupper som betongkross kan indelas i, nämligen restbetong och rivningsbetong. Skillnaden är att restbetongen inte är använd utan har blivit över från betongproduktion, medan rivningsbetongen har använts i projekt och kommer från rivna konstruktioner. I Sverige genereras det årligen ca. 40 000 ton restbetong och 0,3–3 miljoner ton rivningsbetong, beroende på hur stor rivningsaktivitet det är i Sverige (Vägverket, 2007). Av all betong som produceras i Sverige blir ungefär 7 % restbetong. Anledningen till detta är främst beställare som beställer för mycket material, eller att beställningen avrundas uppåt för att få till effektiva transporter med fulla lastbilar (Jepsson & Nyberg, 2017).

Den största skillnaden mellan rest- och rivningsbetong är att restbetongen är ren, medan rivningsbetongen oftast har förorenats under tiden i den tidigare konstruktionen av exempelvis trä, plast och papper (Vägverket, 2007). Detta kommer att diskuteras mer i kapitel 3.2.3.

3.2.1. Egenskaper

När det gäller betongkrossets egenskaper spelar främst ursprung och hantering en avgörande roll (Arm, 2003), det vill säga hur betongen har använts tidigare, vilka egenskaper ursprungsbetongen har samt hur krossning och rening har utförts (Vägverket, 2007). Reningen bör främst fokuseras på lättbetong och tegel, två material som har kraftig negativ påverkan på betongkrossets egenskaper. (Jingfors & Nilsson, 2018). En skillnad kan göras mellan så kallad vertikal och horisontell betong, där vertikal betong kommer

ifrån exempelvis byggnader eller broar och horisontell betong kommer från trottoarer, vägar och gator. Jämförelser mellan dessa två typer har visat att vertikal betong har bättre egenskaper som obundet material, vilket främst beror på att den har betydligt lägre föroreningsgrad än den horisontella betongen (Ardalan et al., 2020). Något som också påverkar egenskaperna hos betongkross är komprimeringen, eller packningen. En hög packningsgrad på materialet bidrar till en ökning av sammanhållning, uthållighet och minskade permanenta deformationer (Molenaar & van Niekerk, 2002).

Betongkross av god kvalitet och låg föroreningsgrad har liknande hållfasthetsegenskaper som bergkross, i flera fall till och med bättre (Jepsson & Nyberg, 2017; Vägverket, 2007). En tydlig skillnad mellan betongkross och traditionellt bergkross är att betongkross har en efterbindningseffekt som gör att styvheten och stabiliteten ökar under en viss tid efter packning (Jepsson & Nyberg, 2017), vilket beror på ohydratiserat cement som reagerar (Westling, 1999). Detta har visats i både laboratorie- och fältförsök, dock har ökningen varit större i fältförsök där styvheten efter tre månader har uppmätts vara två till tre gånger så stor som den uppmätta styvheten vid utläggning. Denna skillnad tros bero på att betongen utsätts i högre grad för karbonatisering ute i fält vilket bidrar till efterbindningen (Arm, 2003). Faktorer som påverkar denna effekt är främst betongens ålder, cementinnehåll och kornstorlek, där det främst är små kornstorlekar mindre än 0,15 mm som bidrar (Poon et al., 2006). Detta har en positiv effekt på lagrets bärighet, men det kan också innebära problem om betongen skulle behöva grävas upp för underhåll eller liknande, eftersom denna process försvåras om betongen bundits samman hårt. För att motverka detta kan mer ballast blandas in i betongkrossen för att på så sätt minska denna effekt något (Tyllgren, 2007). Det är viktigt att försiktighet iaktas vid packning av lager högt upp i överbyggnaden, eftersom det finns risk att för hård packning kan påverka bärigheten hos underliggande betongkrosslager negativt (Johansson, 1998).

När det gäller stabilitet har det också visat sig att betongkross visar upp motsvarande egenskaper som ett bra bergmaterial, förutsatt att ursprungsbetongen har en god tryckhållfasthet på minst 25 MPa samt att betongkrossen har en välgraderad kornkurva och innehåller oregelbundna och skrovliga korn snarare än runda och släta (Ydrevik, 1999). Försök har dock visat att detta endast gäller vid belastningar upp till 1,2 MPa. Om belastningen överstiger detta värde blir materialet känsligt för nedkrossning, vilket har negativ inverkan på både bärighet och stabilitet. Detta är sällan ett problem i förstärkningslagret, men högre upp i konstruktionen, i bärlagret, kan så höga belastningar uppstå (Johansson, 2011).

En svårighet med betongkross är att det finns många parametrar som påverkar materialets kvalitet, vilket gör att materialet är svårbedömt som en enda materialgrupp. Som tidigare nämnt minskar hållfastheten om ursprungsbetongen är av lägre kvalitet, men även en mindre största kornstorlek, lägre densitet, större andel finmaterial, porös cement och olika föroreningar påverkar materialets egenskaper negativt (Arm, 2003). Anledningen till att en större andel finmaterial inte är gynnsamt är att cementen i betongkrossen är mer poröst än själva ballasten, och därför krossas lättare. Detta gör att de minsta fraktionerna övervägande innehåller cementpasta, och därmed blir svagare (Westling, 1999).

En annan nackdel med betongkross är att materialet har betydligt större vattenabsorption än bergkross. Det exakta måttet på detta kan variera, men tester har visat att vattenabsorptionen kan vara 14 gånger så stor för betongkross (Ydrevik, 1999). Detta har ingen större direkt påverkan på materialets egenskaper i sig (Jayakody et al., 2019), men ett problem med en hög vattenabsorption är att när materialet suger åt sig mer vatten ökar risken för problem vid frost, så som frostsprängning (Ydrevik, 1999). Betongkross kan dessutom vara mer känsligt för nedkrossning vid höga belastningar än bergkross, något som kan leda till problem som permanenta deformationer ifall det används högt upp i en konstruktion (Johansson, 2011; Ydrevik, 1999). Detta nämns dock inte som en nackdel i internationell litteratur där betongkross anges som ett bra alternativ även till bärlager (Ardalan et al., 2020).

3.2.2. Användning

Krossad betong kan användas som obundet material, men utöver detta kan det även användas till underbyggnad och fyllningsmassor. I obundna lager har betongkross använts i Sverige sedan 1990-talet (Vägverket, 2007).

Som obundet material kan betongkross användas i både bär- och förstärkningslager, med vissa restriktioner och undantag. Egenskaperna hos betongkross utnyttjas bäst om materialet används i förstärkningslagret. Detta beror på att den efterbindning som beskrevs i föregående avsnitt förstärks ju tjockare lagret är (Ydrevik & Arm, 2001), och förstärkningslagret är som tidigare nämnt vanligtvis 420 mm tjockt medan bärlagret endast är 80 mm tjockt. För att effekten ska kunna utnyttjas bör lagret vara minst 150 mm tjockt (Vägverket, 2007).

Krossad betong bör dessutom undvikas i bärlager på bilvägar på grund av dess känslighet för nedkrossning. Denna risk ökar ju högre upp i konstruktionen betongkrossen finns, och om det används i bärlagret finns risk att permanenta deformationer uppstår (Ydrevik, 1999). En annan anledning till att undvika krossad betong i bärlagret är att en placering högt upp i konstruktionen kombinerat med betongens stora vattenabsorption ökar risken för saltinträngning och frostsador i materialet (Ydrevik & Arm, 2001). Av samma anledning bör betongkross undvikas i områden där det finns risk för stor genomströmning av vatten och höga vattennivåer, till exempel vid vattentrummor och brunnar. Dessa problem kan dock motverkas något med hjälp av ett tätt bundet lager ovanför bärlagret. (Trafikverket, 2013a) På lägre belastade ytor, så som exempelvis cykelvägar, fungerar betongkross bra även i bärlagret (Johansson, 2011).

Ett stort problem när det kommer till användning av betongkross i obundna lager är att kunskapen om materialet hos beställarna är låg (Arm, 2003). Betongkross har genom åren fått ett svagt rykte på grund av krosskänsligheten och den höga vattenabsorptionen, vilket har lett till att materialet av många ses som ointressant (Johansson, 2011). Detta gör att betongkross inte används i lika stor utveckling som det skulle kunna göra. Det har dessutom varit så att testmetoder för obundna material länge har varit anpassade efter bergkross, och testar kornegenskaper snarare än egenskaper för ett helt lager, något som gynnar traditionellt bergkross gentemot krossad betong (Arm, 2003). Ökad kunskap hos beställare och andra aktörer skulle alltså kunna vara ett sätt att öka användningen (Johansson, 2011).

3.2.3. Klimat- och miljöpåverkan

Betong är ett material som har en stor klimatpåverkan, vilket främst är kopplat till produktionen av cement. Koldioxidutsläppen från produktionen motsvarar 2–3 % av Sveriges totala utsläpp av koldioxid per år (Ekman & Jönsson, 2020). Dessa utsläpp ingår dock inte när betongen återvinns, eftersom det då inte behöver produceras ny betong. För återvunnet betongkross är det främst under brukarskedet som materialet har störst påverkan, till skillnad från bergkross som istället har sin största klimatpåverkan under själva brytningen i täkter och i produktionen (Bendz et al., 2000). Vid användning av betongkross är det framför allt andelen främmande ämnen i betongen som avgör hur stor påverkan blir (Arm, 2003). Det är därför viktigt att betongen är rensad och fri från främmande material och ämnen.

En stor skillnad mellan rivnings- och restbetong är som tidigare nämnt att restbetong inte är använd och därför inte har utsatts för några föroreningar. Restbetong kräver därför inte några klimat- och miljömässiga åtgärder innan användning (Vägverket, 2007). För rivningsbetong är däremot reglerna striktare. Vid rivningen ska en rivningsplan upprättas enligt Plan- och bygglagen (Sveriges riksdag, u.å.), där materialmängder och mängd farliga material ska finnas med. Dessa farliga material måste sedan plockas bort innan rivningen påbörjas (Jepsson & Nyberg, 2017). Det ska kunna styrkas med ett skriftligt intyg att betongkrossen är fritt från ämnen som påverkar miljön, till exempel kvicksilver, asbest, PCB, PAH och CFC. Det ska även finnas med vilken typ av betong krossen kommer ifrån, samt var och hur det har använts tidigare. Intyget ska göras redan när rivningen av den gamla konstruktionen planeras (Vägverket, 2007; Trafikverket, 2013a).

Förutom ovanstående ämnen behöver rivningsbetong även rensas från olika metaller som kan ha förorenat den. Metallen kommer främst från armering, men kan även komma från ledningar och rör. Exempel på dessa metaller är koppar och bly (Tyllgren, 2007; Trafikverket, 2013c). Metall kan vara svårt att få bort från betongen och det är inte ovanligt att en liten del metall kommer igenom reningsprocessen. För att säkra upp ur klimat- och miljösynpunkt är det därför viktigt att betongen kommer ifrån en miljösanerad byggnad, något som också ska göras innan rivningen påbörjas (Tyllgren, 2007).

När det gäller lakning av skadliga ämnen har betongkross mer urlakning än bergkross av framför allt koppar och bly, där framför allt bly är allvarligt och därför viktigt att rensa bort. Halterna kan dock variera beroende på produkt och miljö och därför krävs en enskild riskbedömning för varje fall (Bendz et al., 2000). För att kontrollera detta finns gränser för halter av skadliga ämnen och urlakning som inte får överskridas om materialet ska kunna användas. Dessa gränser visas i tabell 11. Den första kolumnen visar gränser för fasta ämnen i materialet som exempelvis kan leda till upptag av jord eller inandning av damm. Den andra kolumnen visar gränser för kortsiktig urlakning, dvs koncentrationen i det första lakvattnet. Tredje kolumnen visar gränser för långsiktig urlakning, dvs den sammanlagda urlakade mängden (Naturvårdsverket, 2010).

Tabell 11. Nivåer för mindre än ringa risk. TS står för torrs substans. LS står för förhållandet mellan lakvätska och fast material (liquid/solid). Källa: (Naturvårdsverket, 2010)

Ämne	Halt TS (mg/kg)	Utlakning LS 0,1 l/kg (mg/l)	Utlakning LS 10 l/kg (mg/kg)
Arsenik	10	0,01	0,09
Bly	20	0,05	0,2
Kadmium	0,2	0,01	0,02
Koppar	40	0,2	0,8
Krom	40	0,2	1
Kvicksilver	0,1	0,001	0,01
Nickel	35	0,1	0,4
Zink	120	1	4
Klorid	-	80	130
Sulfat	-	70	200
PAH-L	0,6	-	-
PAH-M	2	-	-
PAH-H	0,5	-	-

3.2.4. Exempel på tidigare försök/studier

Mycket av den svenska forskning som hittats kommer från VTI, statens väg- och transportforskningsinstitut, där flera olika studier utfördes i slutet av 1990-talet och början av 2000-talet. Dessa studier har utförts både i laboratorier och i fält.

3.2.4.1. Laborariestudier

Ett exempel på en laborariestudie är den som utfördes 1996 av Hans G Johansson, Krister Ydrevik och Håkan Arvidsson (1996). Där genomfördes tre olika tester; packningsegenskaper, kulkvarnsvärde och treaxialprovning. Vid testningen av packningsegenskaper utfördes en Proctorinstampning för att kunna ta fram högsta torrdensitet och optimal vattenkvot, egenskaper som är viktiga vid packning. Resultatet av detta jämfördes med en annan provpackning som utfördes med hjälp av ett vibrobord, en metod som inte bidrar till lika stor nedkrossning av betongen som instampningen, men där det inte fås ut någon optimal vattenkvot.

Kulkvarnsvärde är ett mått på enskilda korns beständighet mot nötning (SBUF, u.å.), och mäts genom att ett materialprov får rotera i en cylinder tillsammans med stålkulor och vatten. Provet siktas sedan för att kunna avgöra i vilken utsträckning kornen har nötts ned (Trafikverket, 2002). Testet gav ett sämre värde än Trafikverkets krav, dock ifrågasätts om metoden är lämplig för ett material som betongkross eftersom korn med mycket cement har sämre nötningsmotstånd i sig, men som lager får materialet andra egenskaper. Detta har också ifrågasatts i andra publikationer (Arm, 2003).

Slutligen genomfördes även en treaxialprovning, en metod som i princip simulerar de vertikala och horisontella krafter som en väggkropp utsätts för av trafiken. Det går till så att ett prov läggs i en tryckkammare där det sedan utsätts för både en statisk last (ska motsvara tyngden från överliggande lager) och en dynamisk last (ska motsvara trafiklasten). Den permanenta och elastiska deformationen mäts därefter för att få fram provets styvhets- och stabilitetsegenskaper.

3.2.4.2 Fältstudier

Det har också genomförts flera fältförsök på ämnet, där VTI har testat betongkross i obundna lager på flera ställen i Sverige, exempelvis Göteborg, Malmö och Västerås (Ydrevik, 2000). En av de mer omfattande studier som gjorts är en studie av Bo Johansson (1998) i ett samarbete mellan Chalmers, NCC, SBUF och VTI. Studien gjordes i Grums, där en rivning på ett fabriksområde möjliggjorde testning av krossad betong på två provytor, en provväg för lastbilstrafik och en provsträcka för trucktrafik. De två ytorna delades därefter upp i ett antal olika delytor, som sträckte sig från att ha en överbyggnad med endast bergkross till en överbyggnad av enbart betongkross, med några steg emellan där både berg- och betongkross ingick.

Fältförsöken kan delas upp i olika studier; deformationer, bärighet och nedkrossning. Deformationerna mättes kontinuerligt under trafikeringen för att följa hur deformationerna relaterade till antalet överfarter på ytorna. Mätningarna utfördes på ytan såväl som längre ner i överbyggnaden, både på förstärkningslagrets yta och terrassens. Bärigheten mättes med både statisk plattbelastning och fallviktsmätningar (dessa metoder finns beskrivna i avsnitt 2.2.1. och 2.2.2.), där båda metoder användes på asfaltytan, men plattbelastningen även utfördes på de olika lagren i överbyggnaden för att kunna följa bärighetsökningen. Nedkrossningen mättes genom att två bärlagerprov, ett av bergkross och ett av betongkross, placerades ut i varsin provyta. De två proven siktades både före och efter trafikbelastning för att på sätt kunna jämföra hur stor nedkrossning som skett i de olika materialen.

Utöver fältförsöken utfördes även laboratorieundersökningar av ursprungsbetongenstryckhållfasthet, dynamiska treaxialförsök och kornstorleksanalyser för att underlätta jämförelsen av fältförsökens resultat.

3.3. Asfaltgranulat

Detta avsnitt handlar om asfaltgranulat och dess egenskaper som obundet material, hur det används i dagsläget, vilken klimat- och miljöpåverkan användandet kan innebära samt exempel på tidigare försök som utförts.



Figur 14. Asfaltgranulat. Källa: (Jacobson, 2002a)

I Sverige produceras ungefär 7–8 miljoner ton asfalt om året, och varje år återvinns cirka 1,5–2 miljoner ton (Jacobson, 2004). Returasfalt kan delas upp i två olika sorter beroende på hur den tagits upp, nämligen uppbruten eller fräst asfalt (Tyllgren, 2007). Skillnaden mellan dessa, förutom i hur de bryts, är att den frästa asfalten generellt har hög bindemedelshalt och låg andel sten, och vice versa för den uppbrutna asfalten. Det låga bitumeninnehållet och högre andelen stenmaterial hos de uppgrävda massorna gör att dessa är lämpligast att använda till obundna lager, medan fräsmassorna passar bättre att återvinna till ny asfalt (Jacobson, 2004; Trafikverket, 2013c).

Något som kan försvåra återvinning av asfalt är tjära, som användes i asfalt i Sverige fram till 1973, då det slutade användas på grund av negativ inverkan på hälsa och miljö. Asfalt med tjära finns ännu kvar i svenska vägar, och återvinning av detta är svårt och kräver speciella åtgärder (Jepsson & Nyberg, 2017). Detta har testats på stora projekt, exempelvis vid ett motorvägsbygge, med goda resultat (Jacobson, 2007).

3.3.1. Egenskaper

Asfaltsgranulatets egenskaper kan variera beroende på bitumenhalt, kornstorleksfördelning, andel stenmaterial, vatteninnehåll, temperatur och packningsgrad (Trafikverket, 2013c; Jacobson, 2002b). Dessutom kan föroreningar så som byggavfall, jord, aska osv. ytterligare försämra granulatets egenskaper. Det är därför viktigt att asfalten rengörs och rensas innan krossning, samt skyddas från smuts och skräp under lagringstiden (Jacobson, 2002b).

Försök har visat att ett väl utfört lager av asfaltgranulat kan få minst lika bra bärighetsegenskaper som ett lager med traditionellt bergkross, något som har framgått av tester både i laboratorier och i fält (Jacobson, 2002b). Styvhetsmodulen kan uppnå ett värde som är 10–30 % högre än för bergkross (Jacobson, 2004). Däremot är stabiliteten sämre än för berg- och betongkross, ett lager av asfaltgranulat kan vara känsligt för permanenta deformationer. Denna svaghet framträder främst om materialet har hög bindemedelshalt eller inte har packats tillräckligt. (Trafikverket, 2013c; Jacobson, 2004). Den svaga stabiliteten kan leda till efterpackning och permanenta deformationer vid tunga belastningar (Trafikverket, 2013c). En åtgärd mot detta som kan förbättra stabiliteten något är att blanda in mer stenmaterial i granulatet, en metod som används i flera länder utanför Sverige (Jacobson, 2002b; Ullah & Tanyu, 2019). Internationella försök har även visat att det är möjligt att stabilisera materialet genom inblandning av flygaska, vilket kan förbättra både bärighet och stabilitet markant (Camargo et al., 2013).

Precis som betongkross har även asfaltgranulat en härdande effekt som gör att bärighet och stabilitet ökar med tiden (Jacobson, 2004; Jacobson, 2002b). Härdningen beror på att trafikbelastningen och hög temperatur bidrar till att asfalten binder ihop och blir mer som ett asfaltliknande lager (Trafikverket, 2013c; Jacobson, 2002b). Detta innebär att det först sker en efterpackning där spårbildning eller liknande deformationer uppstår, men att materialet efter det binder ihop och blir hårdare och därmed inte blir lika känsligt för vidare deformationer. Denna effekt framgår oftast inte i laborietester, men har noterats tydligare vid fältundersökningar (Jacobson, 2002b).

3.3.2. Användning

Återvunnet asfaltgranulat kan förutom som obundet material användas till ny asfalt, grusslitlager, stödremor, provisoriska byggvägar och fyllnadsmassor (Jacobson, 2002b). Som obundet material kan det användas i både bil- och cykelvägar, men det kan vara lite svårare att få till ett gediget packningsarbete på cykelvägar jämfört med större vägar på grund av platsbrist. Bärigheten blir dock ändå tillräcklig för att materialet ska kunna användas på cykelvägar också (Jacobson, 2004). Vid användning som obundet material är det viktigt att ta hänsyn till de bristande stabilitetsegenskaperna som beskrivs i föregående avsnitt. Därför är det inte rekommenderat att använda asfaltgranulat på ytor där det kan antas vara en stor andel tunga fordon, eller mycket statiska laster, som exempelvis parkeringsytor eller busshållplatser (Jacobson, 2002b; Jacobson, 2004). Detta beror på att dessa laster i kombination med den svaga stabiliteten kan leda till stora deformationer i vägen. Problemet kan åtgärdas något genom att tillsätta mer stenmaterial till granulatet (Jacobson, 2004). Ett annat alternativ är att istället tillsätta asfaltgranulat till bergkross, där en andel upp till 25 vikt-% asfaltgranulat kan tillsättas utan att det påverkar bergkrossets stabilitet nämnvärt (Tyllgren, 2007).

Lager med asfaltgranulat är inledningsvis relativt känsliga för deformationer innan härdningen som beskrivs i föregående avsnitt har ägt rum. Detta gör att en yta med asfaltgranulat bör ligga öppen för trafik under en period på minst två veckor innan överliggande asfaltlager läggs på för bästa resultat (Jacobson, 2002b; Trafikverket, 2013c). Ett exempel på detta visas i figur 15. Anledningen till detta är att vid den inledande trafikeringen sker en initial spårbildning, en efterpackning av materialet. Denna spårbildning kan sedan åtgärdas vid utläggning av asfaltlagren, vilket är enklare än att åtgärda när de redan är pålagda (Jacobson, 2004). Efter den initiala spårbildningen upphör efterpackningen och granulatet blir hårdare och lagret uppnår då högre bärighet och stabilitet (Jacobson, 2002b; Trafikverket, 2013c). Det är dessutom inga större problem att trafikera en öppen yta med packat, obundet asfaltgranulat eftersom ytan både blir jämn och dammfri (Vägverket, 2004).



Figur 15. Trafikering av lager med asfaltgranulat innan asfalt läggs på. Källa: (Jacobson, 2002b)

Som tidigare nämnt är packningsarbetet av stor vikt när det kommer till asfaltgranulatets egenskaper. Syftet med packningen är inte bara att uppnå hög skrymdensitet, utan även att få till den vidhäftning som gör att efterbindning kan ske (Jacobson, 2002b). Därför är det viktigt att packningen utförs på ett korrekt sätt. Det bästa resultatet fås om granulatet läggs

ut och packas under årets varma delar, eftersom det underlättar för asfalten att binda ihop (Vägverket, 2004). Packningen bör utföras med en tung stålvalsvält på minst 15 ton, som packar lagret ordentligt på djupet. Detta bör följas av ytterligare en packning med gummihjulsvält som knådar till och jämnar ut lagerytan, något som framför allt är viktigt om lagret ska trafikeras (Jacobson, 2002b).

Vid packningen är det också viktigt med vatteninnehållet i materialet. Den optimala vattenkvoten för bästa packningsresultat ligger mellan 4–6 % för obundna lager och gäller även för asfaltgranulat (Jacobson, 2002b). Skillnaden för asfaltgranulat gentemot andra material är att det inte gör något om vattenkvoten är något högre, eftersom vattnet har en smörjande effekt på granulatet som kan vara positiv vid packningen (Jacobson, 2004; Trafikverket, 2013c). På grund av detta är det vanligt att materialet vattnas innan packning. Vid utläggning blir asfaltgranulatet relativt poröst, vilket innebär att vattningen måste ske nära inpå den efterföljande packningen för att vattnet inte ska hinna rinna igenom materialet (Vägverket, 2004). Packningens resultat påverkas också av lagrets tjocklek, där lager tjockare än 150 mm kan vara svåra att packa med optimalt resultat (Jacobson, 2004).

En nackdel med asfaltgranulat är att materialet åldras efter upptagning då det lagras innan vidare användning, vilket främst ter sig i en förhårdning av asfaltens bindemedel. När detta skett är det inte längre lämpligt att återvinna granulatet till ny asfalt, eftersom kraven på asfalten är högre där. Det åldrade materialet går dock fortfarande bra att använda till obundna material och fyllnadsmassor. Därför bör nyupptaget granulat främst användas till ny asfalt, medan äldre material kan användas till obundna lager (Jepsson & Nyberg, 2017). Det bästa resultatet för obundna lager ges dock om även de massorna har krossats så nära inpå utläggningen som möjligt, samt inte har legat lagrade i stora högar (Jacobson, 2002b; Jacobson, 2004).

3.3.3. Klimat- och miljöpåverkan

En fördel med återvinning av asfalt är att det är relativt lätt att återvinna materialet. Både fräsning och grävning är enkla ingrepp jämfört med stenbrytning och utrustningen som krävs för sönderdelning och krossning är även den enkel. Enkelheten i återvinningen gör att stora mängder kan återvinnas med mindre arbete och resurser (Vägverket, 2004).

Den största frågan gällande klimat- och miljöpåverkan när det gäller asfaltgranulat handlar om huruvida materialet innehåller tjära eller inte (Tyllgren, 2007). Tjära användes i svensk asfalt fram till 1973 då det förbjöds på grund av dess skadliga effekter på hälsa och miljö (Jacobson, 2002b). Dock stöts det fortfarande på vid återvinning av asfalt, och det är då viktigt att sortera så att asfalt med tjära inte blandas med asfalt utan. För att identifiera tjära kan olika metoder användas, till exempel lukttester eller undersökningar med UV-lampa (Jacobson, 2002b). Problemet med tjära är att det innehåller polycykliska aromatiska kolväten (PAH), en grupp organiska ämnen som är giftiga och i många fall cancerframkallande. Mängden PAH brukade tidigare analyseras genom att 16 olika PAH valdes ut som målsubstanser som mättes för att på så sätt få fram PAH-mängderna och även mängden tjära i ett asfaltprov. Idag är det dock vanligare att PAH istället delas in efter molekylvikt i grupperna låg, medel och hög (L, M och H) (Trafikverket, 2014b). Denna indelning använder sig Naturvårdsverket av i deras riktlinjer som framgår av tabell

12. Asfalt med innehåll av tjära är svårhanterligt, men möjligt att återvinna med särskilda åtgärder (Jacobson, 2007).

Tabell 12. Riktvärden för förorenad mark från Naturvårdsverket gällande maximal mängd PAH. TS står för torrsubstans, KM för känslig mark och MKM för mindre känslig mark. Källa: (Trafikverket, 2014b).

	Halt TS för KM (mg/kg)	Halt TS för MKM (mg/kg)
PAH-L	3	15
PAH-M	3	20
PAH-H	1	10

När det gäller asfaltgranulat utan innehåll av tjära är klimat- och miljöpåverkan liten. Tjärfri asfalt avger i stort sett inga PAH överhuvudtaget, något som bekräftats i tester i både Sverige och Danmark. Inte heller andra skadliga ämnen som fenol, mineralolja och bly avges från tjärfritt asfaltgranulat (Lindgren, 1998). Tester har också visat att urlakning av föroreningar eller andra skadliga ämnen är så liten från både ny och återvunnen asfalt att de inte kan anses ha någon negativ inverkan på miljö, klimat och grundvatten (Jacobson, 2004; Vägverket, 2004; Alam et al., 2010).

Den tydligaste vinsten miljö- och klimatmässigt gentemot bergkross ligger i att det inte behöver brytas nytt material eller göras ingrepp i naturen, samt att transporterna kan minska. Detta kan exempelvis leda till en minskad nedbrytning av ozonlagret, minskad användning av fossila bränslen och minskad global uppvärmning (Hasan et al., 2020).

3.3.4. Exempel på tidigare försök/studier

Även när det gäller asfaltgranulat har VTI gjort mycket forskning, främst i början av 2000-talet. Även här delas exemplen upp i laboratorie- och fältförsök.

3.3.4.1. Laboriestudier

En omfattande laboriestudie gjordes år 2002 av Torbjörn Jacobson (2002a). Detta försök bestod dels av en undersökning av materialets packningsegenskaper, dels av en treaxialprovning. Testerna av packningsegenskaperna inleddes med att ta fram optimal vattenkvot, vilket gjordes genom att prover utsattes för tung instampning vid olika vattenkvoter. De olika packningskurvorna jämfördes sedan för att se vid vilken kvot bäst packning hade uppnåtts. Utöver detta genomfördes även en gyratorisk packning, som är en metod som används för att bestämma konsistensen och packningsbarheten hos ett material. Proverna packas då i cykler där mätningar genomförs under tiden för att följa hur packningsarbetet ser ut.

Treaxialprovningen genomfördes enligt samma procedur som finns beskrivet i avsnitt 3.2.4.1., med skillnaden att det i detta försök gjordes flera provningar där olika parametrar ändrades för att se hur dessa påverkade resultatet. Dessa parametrar var inblandning av mer stenmaterial, ökad temperatur, ökad vattenkvot, långtidslagring och belastningshastighet.

3.3.4.2. Fältstudier

I samma studie av Torbjörn Jacobson ingick även fältstudier (Jacobson, 2002b). Studierna gjordes på en stadsgata i Göteborg, där gatan vid en ombyggnad utfördes med asfaltgranulat i bär- och förstärkningslager istället för bergkross. Detta gjordes även för en

gång- och cykelväg i nära anslutning till gatan. Gatan hade en ÅDT på 1500–2000 fordon och en hastighet på 30 km/h. Gatan delades in i kortare provsträckor, där några sträckor innehöll traditionellt bergkross för att kunna jämföra resultaten.

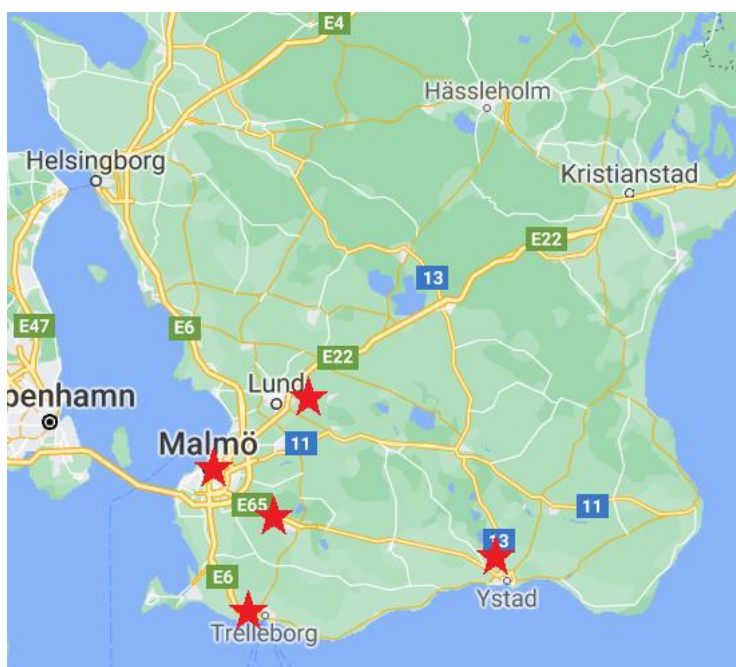
Fältförsöken som utfördes var statisk plattbelastning, fallviktsmätning och undersökning av spårbildning. Plattbelastningen utfördes både på förstärknings- och bärlager. Efter detta låg bärlagerytan öppen för trafik under en månads tid innan överliggande lager påfördes. På den färdiga gatan genomfördes sedan fallviktsmätningar, som även följdes upp med nya fallviktsmätningar efter ett år. Slutligen mättes även spårbildningen, för att undersöka vägens känslighet mot permanenta deformationer.

Precis som vid fältförsöken av betongkross föregicks mätningarna av laboratorieundersökningar där kornfördelningskurva, bindemedelshalt och andel stenmaterial fastställdes.

3.4. Platsbesök ÅGAB Syd AB

ÅGAB tar främst in rivningsbetong från byggnader, broar etc. ifrån närområdet, ca 2–3 mils omkrets från de olika anläggningarna. ÅGAB har följande anläggningar (ÅGAB Syd, u.å.):

- Skabersjö (huvudkontor)
- Malmö
- Lund
- Trelleborg
- Ystad



Figur 16. Karta över ÅGAB Syds anläggningar. Källa: Google maps

De tar in ungefär 12 000 ton betong och 20 000 ton asfalt om året, varav ungefär 80 % består av okrossat material (Nilsson, 2021).

ÅGAB får in analyser i samband med att de tar in material och gör därför inte så mycket egna tester eller provtagningar, utan förlitar sig på analyser, info och utfrågning av leverantör av materialet. Dock sker en del stickprov för att säkerställa kvalitets- och föroreningsgrad, då tas ett prov och skickas till labb för analys av tungmetaller, PAH och ibland även gifter som diklordifenyltrikloretan (DDT) (Silfverberg, 2021; Nilsson, 2021).

Mekanisk bearbetning i form av krossning utförs, där de kan välja fraktioner efter behov och efterfrågan. Det de säljer störst kvantiteter av är fogsand och betongkross i storlek 0–90 som används till vägöverbyggnader. Detta ska kunna motsvara traditionell bergkross (Nilsson, 2021). I figur 17–19 visas bilder på inkommet material till ÅGAB Syd.



Figur 17. Inkommen rivningsbetong. Källa: Egen bild



Figur 18. Inkommen restbetong. Källa: Egen bild



Figur 19. Inkommen asfalt. Källa: Egen bild

3.5. Återvunna material utomlands

Användningen av återvunnen betong i de obundna lagren är vanlig i många europeiska länder, framför allt i Nederländerna, Tyskland, Frankrike och Belgien (Thøgersen et al., 2013). Det beror på att tillgången på bergmaterial inte är så stor där, vilket har tvingat fram en sådan utveckling mer än vad det har gjorts i Sverige (Ydrevik & Arm, 2001; Westling, 1999). I Nederländerna har betongkross använts sedan 1970-talet, och är idag ett vanligt material i landets vägar (Molenaar & van Niekerk, 2002). Även i norra Europa har användningen av krossad betong blivit allt vanligare, med goda erfarenheter från både Danmark och Finland (Molin, 2005). Ämnet är dock inte bara intressant för dessa länder, utan forskningen kring ämnet är spridd över i princip hela världen, med forskning från exempelvis Italien (Ciampa et al., 2020), Australien (Cameron et al., 2013), och Kina (Poon et al., 2006).

När det gäller återvunnen asfalt används det främst till att göra ny asfalt i många europeiska länder (Thøgersen et al., 2013). Detta kan dock variera kraftigt mellan olika länder, exempelvis används endast 10–20 % av den återvunna asfalten till obundna lager i Tyskland, Schweiz och Österrike, medan motsvarande siffra i till exempel Danmark, Norge, Irland och Slovenien ligger på 40–60 % (Thøgersen et al., 2013). I Danmark och Norge förekommer det dessutom att betongkross och asfaltgranulat blandas tillsammans och används som obundet material, en metod som används för att väga upp för asfaltgranulatets bristande stabilitetsegenskaper (Jacobson, 2004). Även när det gäller återvunnen asfalt är forskningen spridd över världen, forskning kring ämnet har till exempel skett i USA (Alam et al., 2010), Australien (Hasan et al., 2020) och Rumänien (Ungureanu et al., 2020).

3.6. Andra återvunna material

Detta arbete behandlar främst återvunnen betongkross och asfalt, men det finns även andra återvunna material som kan användas till obundet material. I detta avsnitt följer en kort presentation av några sådana material.

3.6.1. Masugnsslagg/hyttsten

Masugnsslagg är en restprodukt som uppstår i samband med tillverkning av råjärn. Mängden masugnsslagg som bildas vid råjärnsframställning är relativt stor och uppgår till ungefär 30 viktprocent av råjärnet (Jingfors & Nilsson, 2018). Den utvunna slaggen kan kylas på två olika sätt, vilket ger två olika typer av material. Snabb nedkylning ger ett finkornigt material som kallas hyttsand, som inte är lämpligt att använda som obundet överbyggnadsmaterial. Långsam nedkylning ger istället ett material som kallas hyttsten, med större kornstorlekar och egenskaper och utseende som påminner om traditionellt bergkross (Jingfors & Nilsson, 2018). I Sverige tillverkas ungefär 400 000 ton hyttsten varje år (Vägverket, 2007).

När det gäller egenskaperna hos hyttsten påminner de en del om bergkross, men en tydlig skillnad är att hyttsten är mer poröst. Detta bidrar till en lägre värmekonduktivitet, vilket är bra långt ner i konstruktionen pga. att isoleringen mot tjäle blir bättre, men sämre högt upp i konstruktionen eftersom det ökar risken för blixthalka (Jingfors & Nilsson, 2018; Vägverket, 2007). En annan skillnad är att hyttsten, likt betongkross och asfaltgranulat har

en efterhärdande effekt som gör att lagret binder ihop och bärigheten ökar över tid. Rent storleksmässigt kan bärigheten för hyttsten vara lika bra och även bättre än för bergkross (Jingfors & Nilsson, 2018). En annan egenskap som hyttsten delar med betongkross är känsligheten för nedkrossning, vilket är ännu en anledning till att materialet inte lämpar sig högt upp i konstruktionen, i bärlagret (Vägverket, 2005).

Miljömässigt kan hyttsten vara problematiskt då det innehåller svavel som lätt kan urlakas ur materialet och sänka pH-värdet i närmiljön. Därför bör materialet användas med stor försiktighet i känsliga områden som till exempel vattentäkter (Vägverket, 2007).



Figur 20. Hyttsten. Källa: (Vägverket, 2005)

3.6.2. Slagg

Förutom masugnsslagg finns även andra typer av slagg som kan användas i vägöverbyggnader, till exempel järnsand (kommer ifrån kopparsmältverk) och ferrokromslag (från tillverkning av ferrokrom). Den årliga produktionen i Sverige ligger på ungefär 270 000 ton för järnsand och 125 000 för ferrokromslag (Vägverket, 2007).

Egenskaperna mellan de olika slaggtyperna skiljer sig åt något. Järnsand utmärks av att det har god värmeisolering och låg kapillär stighöjd. Dock är materialets bärighet relativt låg, vilket gör att det inte kan användas i bärlager. Det kan användas i förstärkningslagret om det kompletteras av material med högre bärighet, men störst nytta gör materialet som skyddslager där dess egenskaper bäst kan utnyttjas till att förhindra tjälskador (Vägverket, 2007).

Ferrokromslag däremot har goda bärighetsegenskaper, vilket gör att den kan användas både i bär- och förstärkningslager. Precis som för järnsand är den kapillära stighöjden låg, medan värmeisolering inte riktigt är lika bra som järnsandens. Precis som järnsand kan ferrokromslag också användas i skyddslager (Vägverket, 2007).



Figur 21.järnsand. Källa: (Vägverket, 2007)



Figur 22. Ferrochromslag. Källa: (Västra Götalandsregionen Miljömedicinskt centrum, 2017)

3.6.3. Skumglas

Skumglas är ett material som kommer från återvinning av glasförpackningar. Materialet består av fraktioner som är så små att de inte kan användas för tillverkning av nytt glas. Detta restmaterial mals ner till ett pulver som sedan upphettas och expanderar till större storlek. När skumglas sedan svalnar spricker det upp i mindre bitar igen, vilket är vad det färdiga materialet består av (Brännmark & Norberg, 2019). Materialet har en hög krossrisk och kan därför inte användas i bärlager, men i förstärkningslager fungerar det om spänningarna kan begränsas (SGI, 2007). Vanligast är dock att materialet används som fyllnadsmaterial eller som tjälisolering. Särskilda egenskaper hos skumglas är dess låga densitet, goda isoleringsförmåga samt kornens form som ger en hög friktionsvinkel (Vägverket, 2007).



Figur 23. Skumglas. Källa: (SGI, 2007)

3.6.4. Flygaska

Flygaska är en restprodukt som kommer ifrån förbränning av kol, trä och biobränslen, något som genererar omkring 300 000 ton flygaska om året i Sverige (Vägverket, 2007). Materialet har använts i flera år i bär- och förstärkningslager i grus- och industrivägar, men även som stabilisering av massor eller som ingrediens i bindemedel (Eklöf et al., 2016). Egenskaperna hos flygaska kan variera något beroende på bränsle, typ av förbränning och lagringsmetod, men utmärkande för materialet är de härdande egenskaperna som bidrar till en högre bärighet (Vägverket, 2007; Eklöf et al., 2016). Materialet har även en god frostbeständighet, vilket gör den användbar genom att den kan förbättra en vägs tjälegenskaper (Vägverket, 2007).

Sett till miljön är flygaska ett material som innehåller en hel del lakbara ämnen, som exempelvis natrium, kalium och klorid. Det finns även en stor risk för damm som bör beaktas vid upplägning, vilket görs genom att materialet fuktas (Vägverket, 2007).

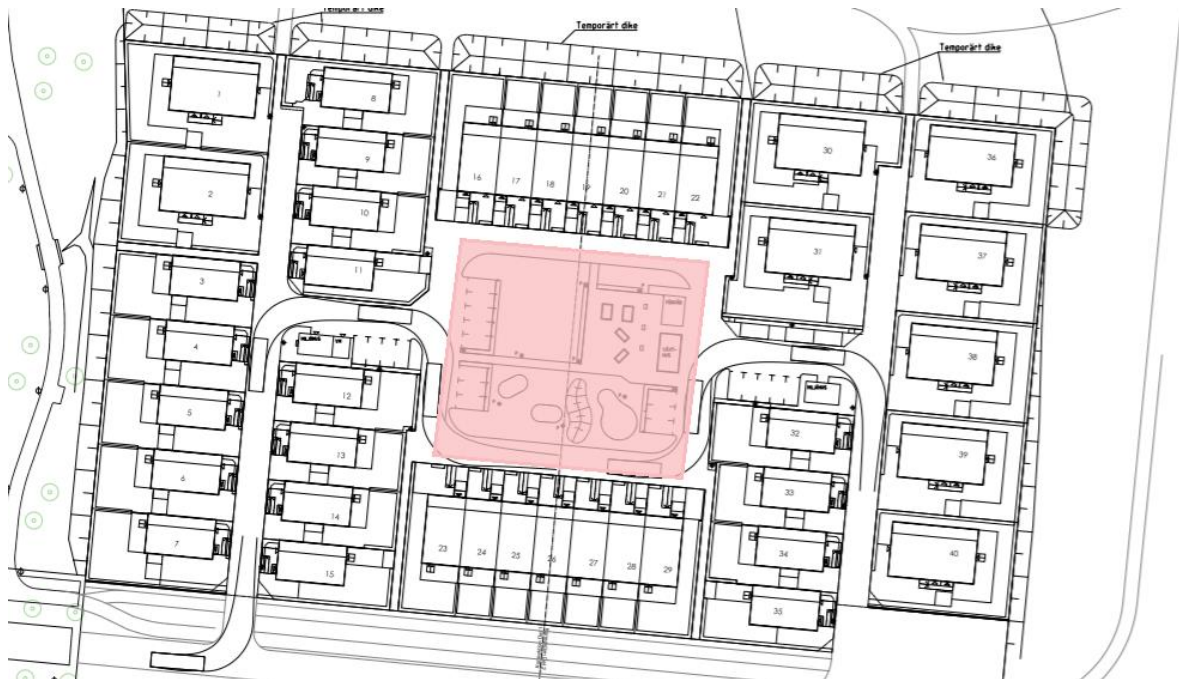


Figur 24. Flygaska i bärlagret på skogsväg. Källa: (SGI, 2006)

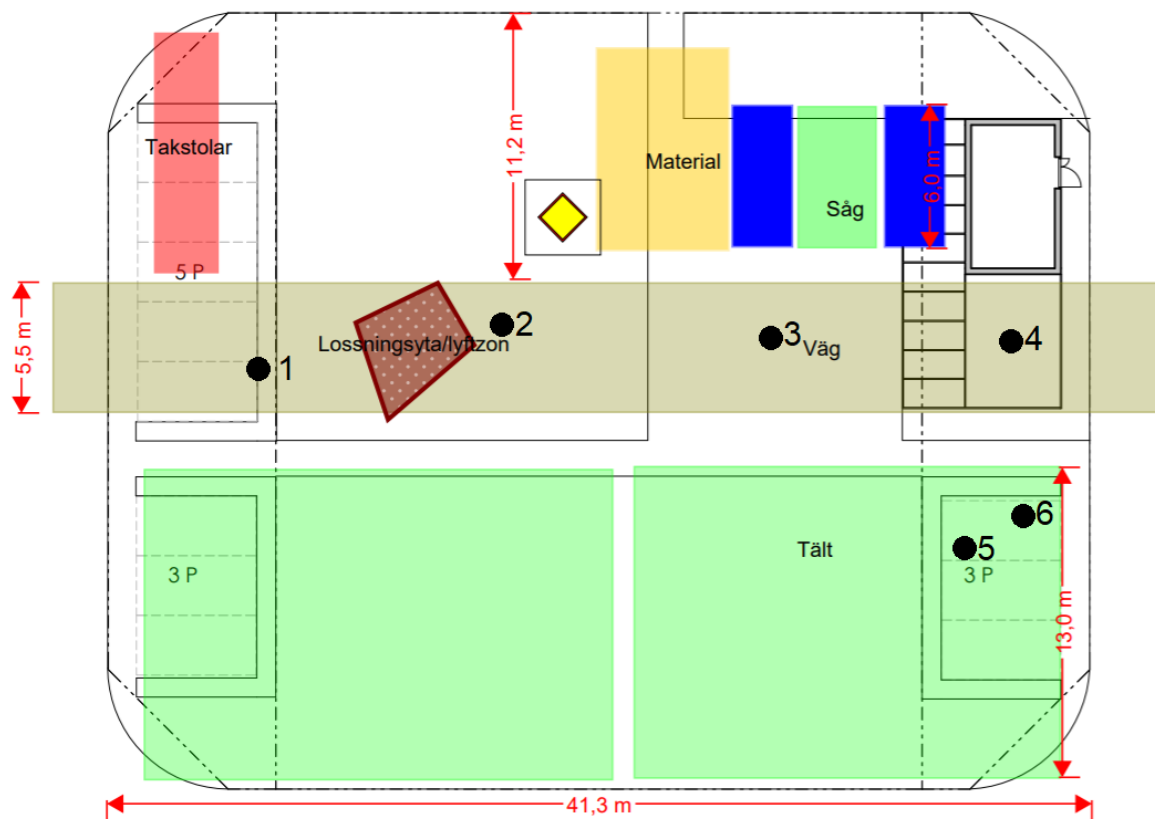
4. Praktiska undersökningar

Plattbelastningsmätningar utfördes på terrass, förstärkningslager och bärlager för var och en av de tre vägdelen (betongkross-, asfaltgranulat- och bergkrossytan). Enligt Trafikverkets (2005) rekommendationer bör minst fem mätpunkter testas på respektive lager, men då provytan är relativt liten jämfört med andra vägprojekt och därför inte antas ha särskilt stora variationer utfördes endast två mätningar per lager och vägdela (dvs. 18 mätningar totalt). Dessutom hade fem mätningar per lager inneburit 45 separata mätningar totalt, vilket hade dragit ut för mycket på tiden för både byggprojektet och detta arbete, då tidsåtgången för en mätpunkt var ungefär en timme.

Mätningarna utfördes under tre olika dagar inom loppet av en vecka, efterhand som de olika lagren påfördes. Mätpunkterna numrerades 1–6, där punkt 1 och 2 är på ytan med betongkross, punkt 3 och 4 på ytan med asfaltgranulat och punkt 5 och 6 på ytan med bergkross. En överblick över området och provpunkternas position kan ses i figur 25 och 26.



Figur 25. Överblick över hur det färdigbyggda området kommer se ut. Det markerade området i mitten är där de tre provytorna finns.



Figur 26. Översikt av provytorna och testpunkterna 1–6.

Punkterna valdes ut slumpvis på längden på ytorna, men placerades relativt centrerat på bredden för att underlätta placeringen av motvikten. Punkterna mättes ut med hjälp av en mättekniker för att samma punkter skulle kunna mätas på alla tre lagren. Som motvikt användes en dumper fullastad med sand för att ge tillräcklig vikt, se figur 27.

Det utfördes en extra omgång mätningar på bärlagret på punkt 1–4 drygt tre veckor efter utläggning. Detta gjordes för att undersöka hur bärighet och bärighetskvot påverkats av att provytorna fått ligga ett tag och dessutom utsättas för daglig belastning från arbetsfordon som vältar, lastbilar etc. Anledningen till att detta inte gjordes för punkt 5 och 6 var att bergkrossytan hade gjorts om och fått ett tjockare förstärkningslager eftersom (420 mm istället för 320 mm) eftersom parkeringsytan där inte var provisorisk, vilket gör att det inte hade gått att jämföra resultaten mellan de olika mätningarna där. Vid denna mätning användes en vält som motvikt, se figur 28.



Figur 27. Motvikten som användes vid mätningarna vid utläggning. Källa: Egen bild



Figur 28. Motvikten som användes vid mätningarna tre veckor efter utläggning. Källa: Egen bild

Ett problem som uppstod under fältförsöken var att sättningen översteg 5 mm redan vid andra eller tredje belastningssteget. Det krävs minst fyra belastningssteg för att ett andragradspolynom ska kunna anpassas till mätpunkterna och därigenom en deformationsmodul ska kunna beräknas. Detta gör att E_{v1} för några mätpunkter inte har kunnat beräknas, vilket i sin tur leder till att det inte heller går att beräkna bärighetskvot för dessa punkter.

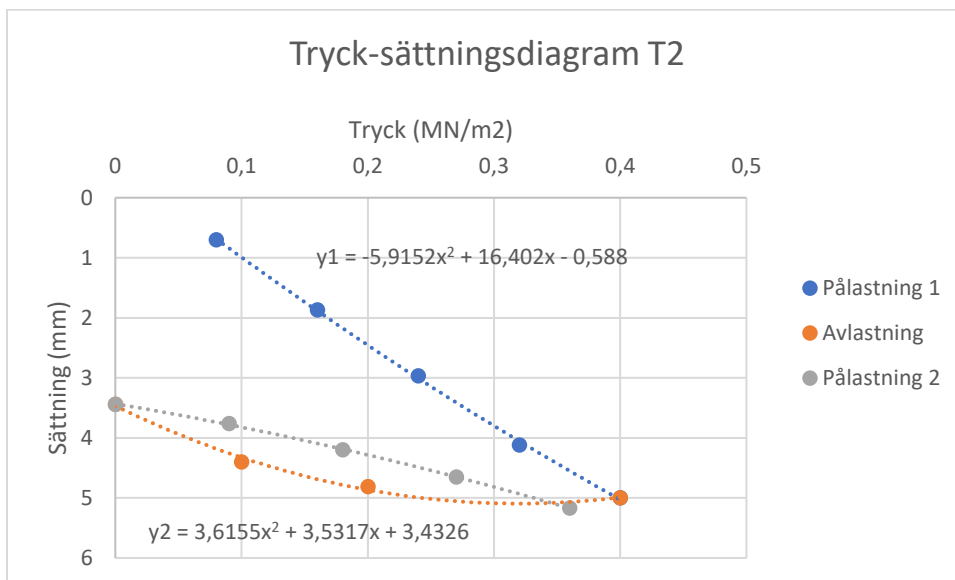
Enligt Trafikverkets metodbeskrivning (Trafikverket, 2014a) ska den andra pålastningen ske i sex jämna steg upp till 90 % av maxlasten om den första pålastningen avbryts pga. av sättningen överstiger 5 mm. Detta missades dock vid mätningarna på terrassen, då andra pålastningen endast skedde i fyra steg. För övriga lager skedde den dock enligt metodbeskrivningen.

5. Resultat

Resultaten redovisas först med att provytorna gås igenom var för sig, för att sedan jämföras med varandra i slutet av kapitlet. För att visa hur mätresultaten ser ut och hur E_v -modulerna har tagits fram redovisas här mätdata för en punkt, punkt 2 på terrassen. Först visas de registrerade värdena från mätningen (tabell 13), sedan ett tryck-sättningsdiagram (figur 29) och slutligen beräkningar av E_v -moduler och bärighetskvot (tabell 14). Fullständiga mätresultat och diagram för samtliga testpunkter finns i bilaga 2.

Tabell 13. Tryck- och sättningsstabell för mätningar på mätpunkt 2, terrass

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,7
0,16	1,87
0,24	2,97
0,32	4,12
0,4	5
0,2	4,81
0,1	4,4
0	3,44
0,09	3,76
0,18	4,2
0,27	4,65
0,36	5,17



Figur 29. Tryck- sättningsdiagram för punkt 2, terrass. Kurvanpassningen för de två pålastningarna används för att beräkna E_v -modulerna.

Tabell 14. Beräkning av Ev-moduler och bärighetskvot med hjälp av konstanter från andragradspolynomen

Pålastning 1		Pålastning 2	
a0	-0,588	a0	3,4326
a1	16,402	a1	3,5317
a2	-5,9152	a2	3,6155
Ev1	16,0302994	Ev2	45,19978
Bärighetskvot:			
Ev2/Ev1	2,819646839		

5.1. Krossad betong

På provytan med krossad betong finns mätpunkterna 1 och 2. Ytan består nedifrån av en lerterrass, förstärkningslager med 320 mm betongkross 0–90 och bärlager med 80 mm REform 0–40. På terrassen för punkt 1 kunde inte E_{V1} beräknas, vilket gör att det inte finns någon bärighetskvot för denna punkt.

5.1.1. Bärighet

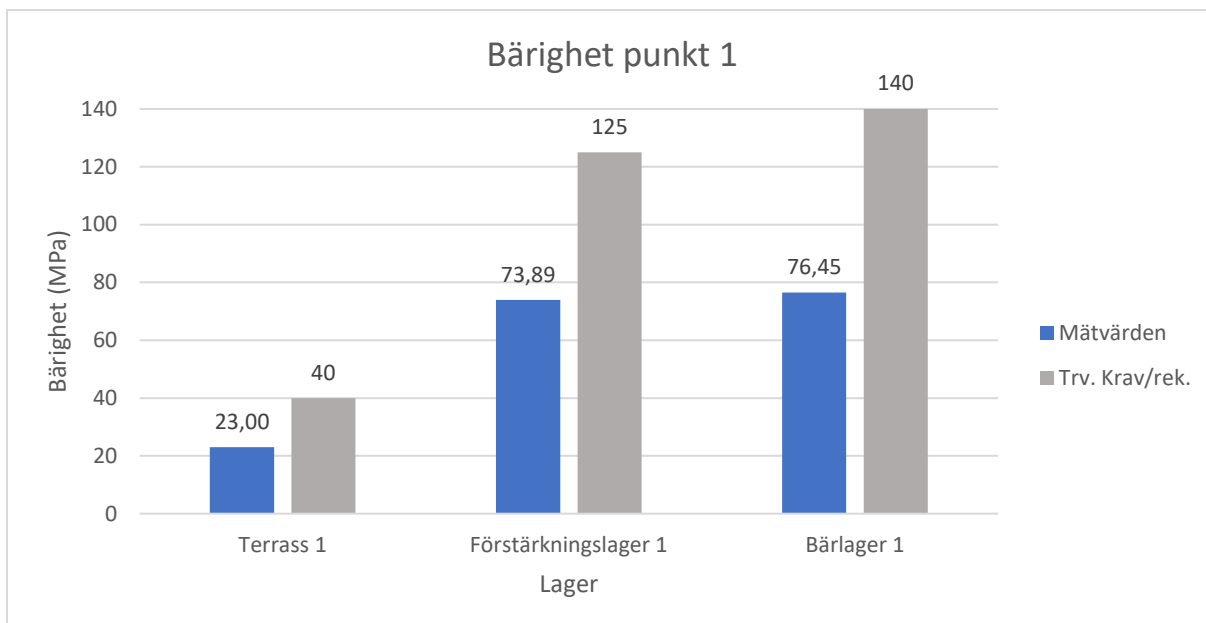
Resultatet visar att ingen av provpunkterna når upp till Trafikverkets krav och rekommendationer för en nybyggd väg när det gäller bärighet. Den ena terrasspunkten, punkt 2, når visserligen upp till kraven, men bärigheten för både förstärknings- och bärlager hamnar under kraven. Förstärkningslagrets effekt på bärigheten är tydlig, där bärigheten mer än tredubblas för punkt 1 (ökning med 50,89 MPa, 221 %) och mer än fördubblas för punkt 2 (ökning med 57,75 MPa, 128 %). Bärighetsökningen mellan förstärknings- och bärlager är däremot liten, med endast 2,56 MPa (3,46 %) för punkt 1 och 1,49 MPa (1,45 %) för punkt 2. Resultaten visas i tabell 15 och figur 30 och 31.

5.1.2. Bärighetskvot

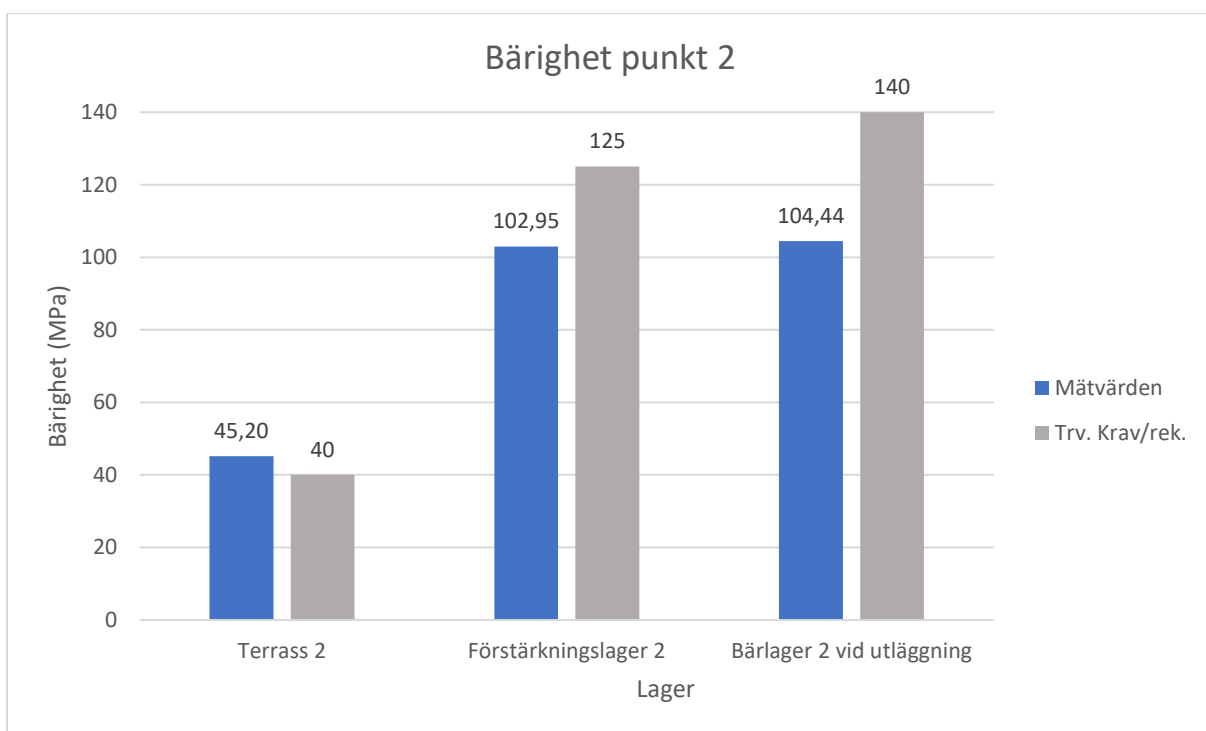
Inte heller bärighetskvoterna klarar av Trafikverkets rekommendation på max 3,5 för förstärkningslagret eller kravet på max 2,8 för bärlagret, vilket tyder på otillräcklig packning. Även detta visas i tabell 15.

Tabell 15. Översikt över mätpunkt 1 och 2 på provytan med krossad betong vid utläggning. För terrass och bärlager gäller krav från Trafikverket medan det för förstärkningslagret är rekommendationer. FL = förstärkningslager, BL = bärlager.

	Krossad betong					
	Punkt 1		Punkt 2		Trafikverkets krav/rek.	
	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet min. (MPa)	Bärighetskvot max.
Terrass	23,00	-	45,20	2,82	40	-
FL	73,89	3,65	102,95	3,85	125	3,5
BL	76,45	4,45	104,44	3,09	140	2,8



Figur 30. Diagram som visar hur bärigheten ökar för varje lager i punkt 1. För terrass och bärlager gäller krav från Trafikverket medan det för förstärkningslagret är rekommendationer. Trv = Trafikverket, rek = rekommendationer.



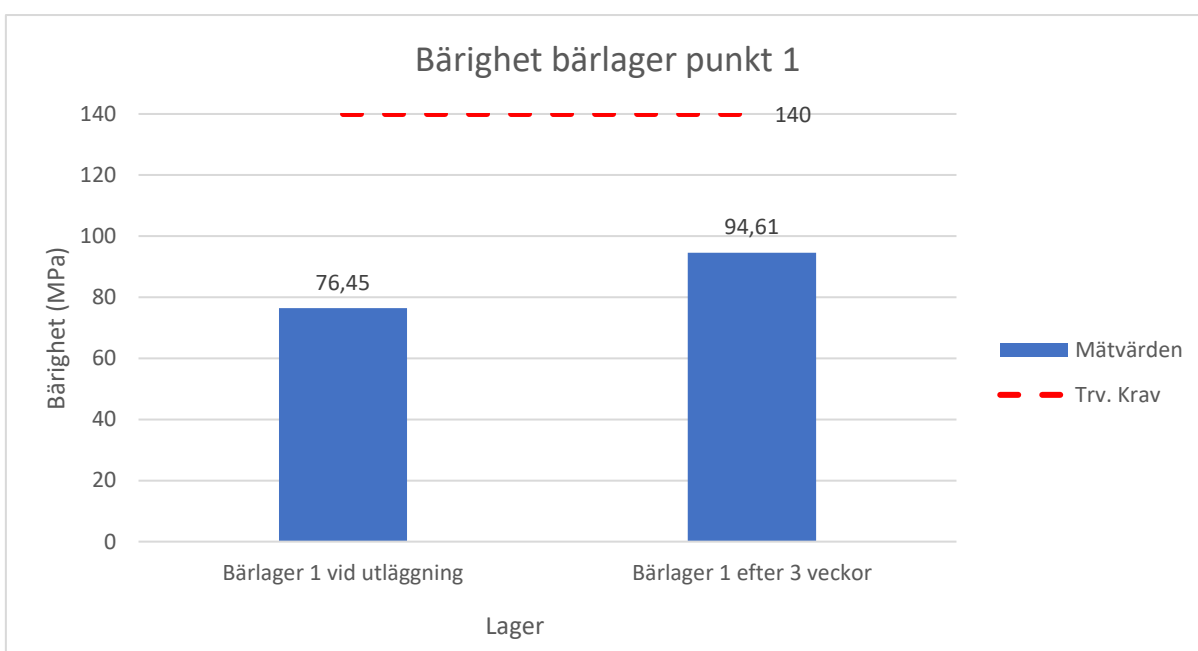
Figur 31. Diagram som visar hur bärigheten ökar för varje lager i punkt 2. För terrass och bärlager gäller krav från Trafikverket medan det för förstärkningslagret är rekommendationer. Trv = Trafikverket, rek = rekommendationer.

5.1.3. Tre veckor efter utläggning

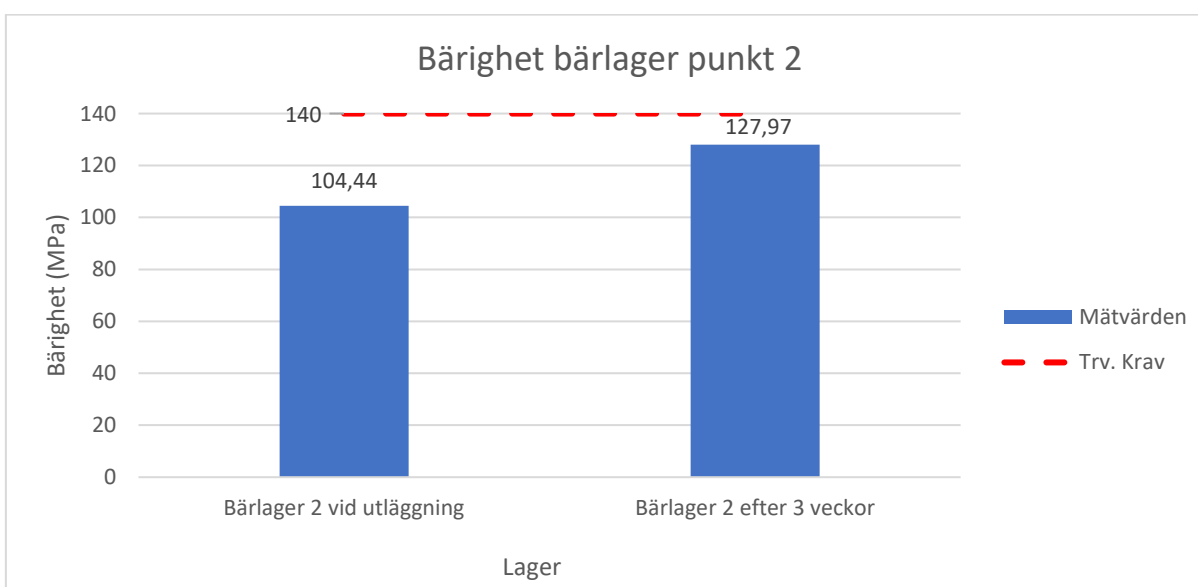
Mätningarna på bärlagret tre veckor efter utläggning visar att en bärighetstillväxt har skett, då bärigheten ökat med 18,16 MPa (23,8 %) för punkt 1 och 23,53 MPa (22,5 %) för punkt 2 jämfört med utläggningen. Dessa resultat visas i tabell 16 och figur 32 och 33. Även bärighetskvoterna har förbättrats, och både punkt 1 och 2 klarar nu Trafikverkets krav för maximal bärighetskvot, vilket framgår av tabell 16.

Tabell 16. Jämförelse mellan bärlagret i punkt 1 och 2 vid utläggning och efter tre veckor. BL = bärlager.

	Krossad betong					
	Punkt 1		Punkt 2		Trafikverkets krav	
	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet min. (MPa)	Bärighetskvot max.
BL (vid utläggning)	76,45	4,45	104,44	3,09	140	2,8
BL (efter 3 veckor)	94,61	2,78	127,97	2,24	140	2,8



Figur 32. Jämförelse mellan bärlagret i punkt 1 vid utläggning och efter tre veckor. Trv = Trafikverket.



Figur 33. Jämförelse mellan bärlagret i punkt 2 vid utläggning och efter tre veckor. Trv = Trafikverket.

5.2. Asfaltgranulat

På provytan med asfaltgranulat finns mätpunkterna 3 och 4. Ytan består nedifrån av en lerterrass, förstärkningslager med 320 mm bergkross 0–90 och bärlager med 80 mm REform 0–40. På terrassen för punkt 3 och 4, samt förstärknings- och bärlager för punkt 3 kunde inte E_{V1} beräknas, vilket gör att det inte finns någon bärighetskvot för dessa punkter.

5.2.1. Bärighet

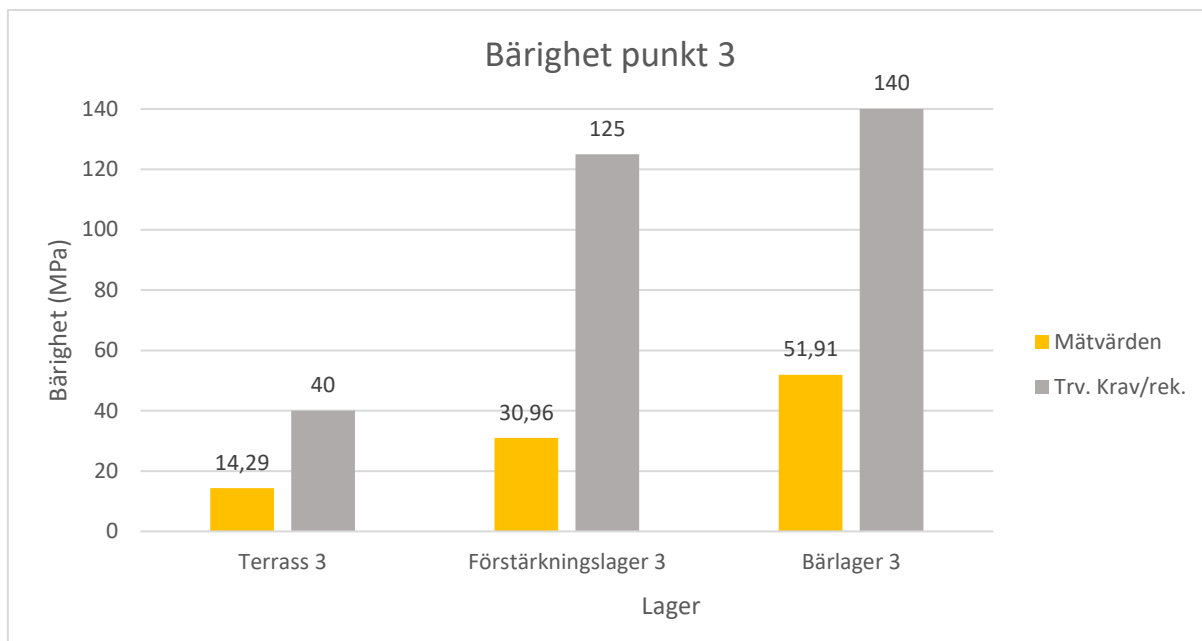
Inte heller för asfaltgranulatytan uppnår någon av mätningarna en bärighet som motsvarar Trafikverkets krav, oavsett lager. Även här har förstärkningslagret stor effekt, där bärigheten för punkt 3 lite mer än fördubblas jämfört med terrassen (ökning med 16,67 MPa, 117 %), medan bärigheten i punkt 4 nästan tredubblas (ökning med 33,83 MPa, 195 %). Jämfört med provytan med krossad betong sker här en större ökning av bärigheten när bärlagret läggs på, ökningen är 20,95 MPa (67,67 %) för punkt 3 och 32,03 MPa (62,58 %) för punkt 4. Resultaten visas i tabell 17 och figur 34 och 35.

5.2.2. Bärighetskvot

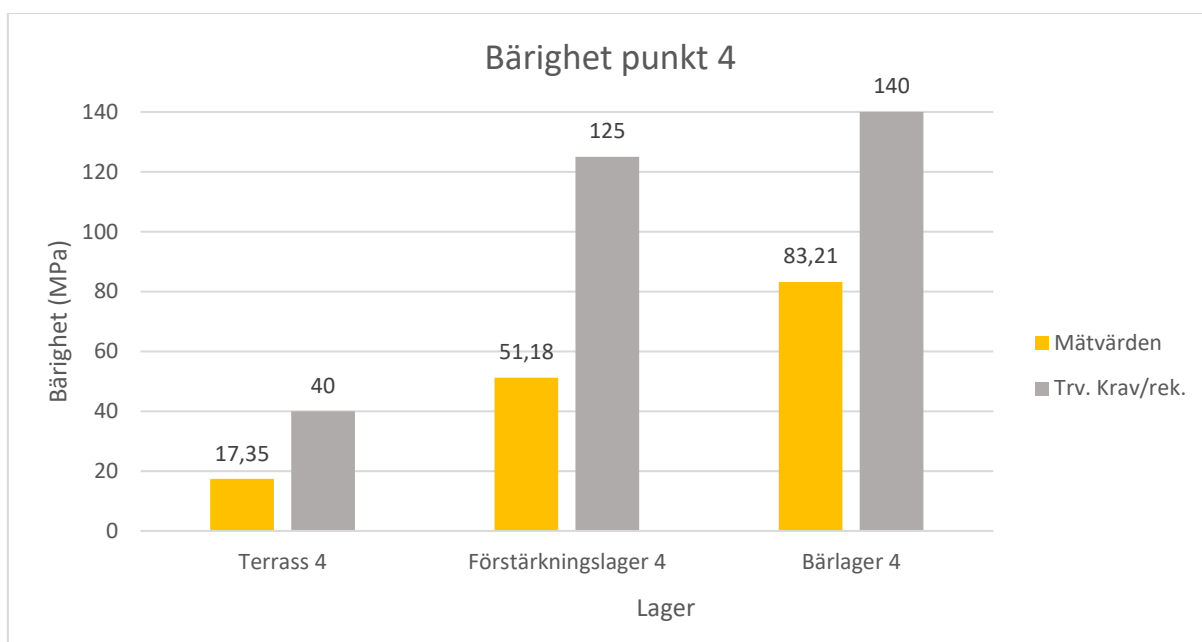
Trafikverkets krav på bärighetskvot är inte uppfyllda för någon av de två mätpunkter där kvoten gick att beräkna, vilket endast var på förstärknings- och bärlagret i punkt 4. Speciellt för förstärkningslagret är kvoten hög jämfört med maxrekommendationen (5,72 mot rekommendationen på 3,5), vilket även här tyder på ett otillräckligt packningsarbete. Även detta visas i tabell 17.

Tabell 17. Översikt över mätpunkt 3 och 4 på provytan med asfaltgranulat vid utläggning. För terrass och bärlager gäller krav från Trafikverket medan det för förstärkningslagret är rekommendationer. FL = förstärkningslager, BL = bärlager.

	Asfaltgranulat					
	Punkt 3		Punkt 4		Trafikverkets krav/rek.	
	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet min. (MPa)	Bärighetskvot max.
Terrass	14,29	-	17,35	-	40	-
FL	30,96	-	51,18	5,72	125	3,5
BL	51,91	-	83,21	3,42	140	2,8



Figur 34. Diagram som visar hur bärigheten ökar för varje lager i punkt 3. För terrass och bärlager gäller krav från Trafikverket medan det för förstärkningslagret är rekommendationer. Trv = Trafikverket, rek = rekommendationer.



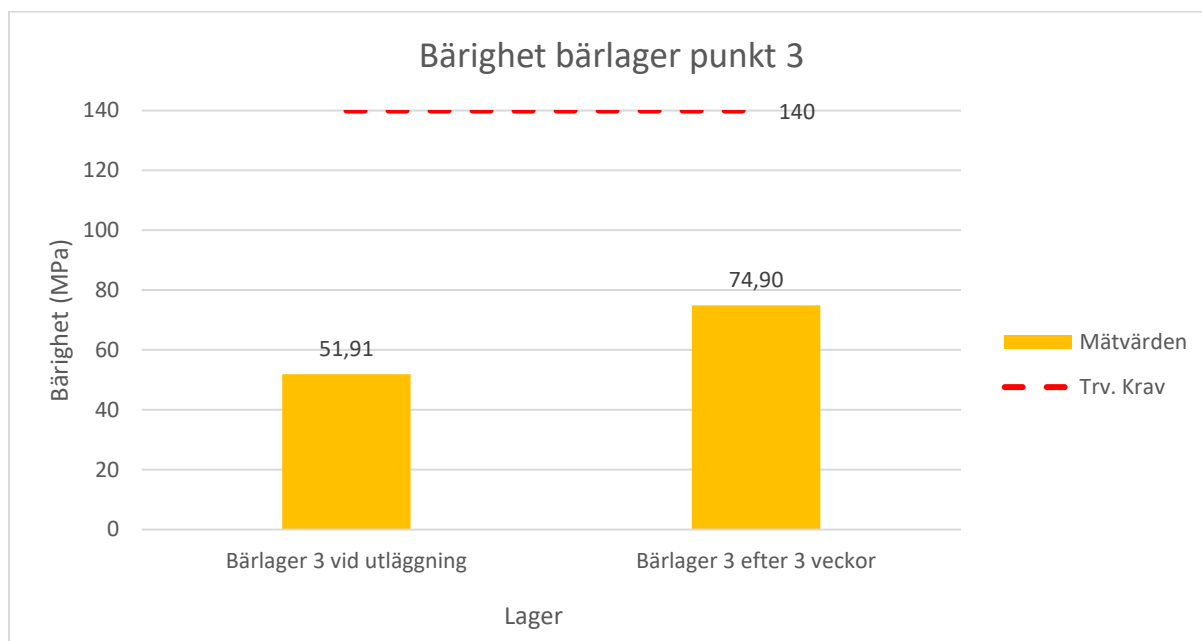
Figur 35. Diagram som visar hur bärigheten ökar för varje lager i punkt 4. För terrass och bärlager gäller krav från Trafikverket medan det för förstärkningslagret är rekommendationer. Trv = Trafikverket, rek = rekommendationer.

5.2.3. Tre veckor efter utläggning

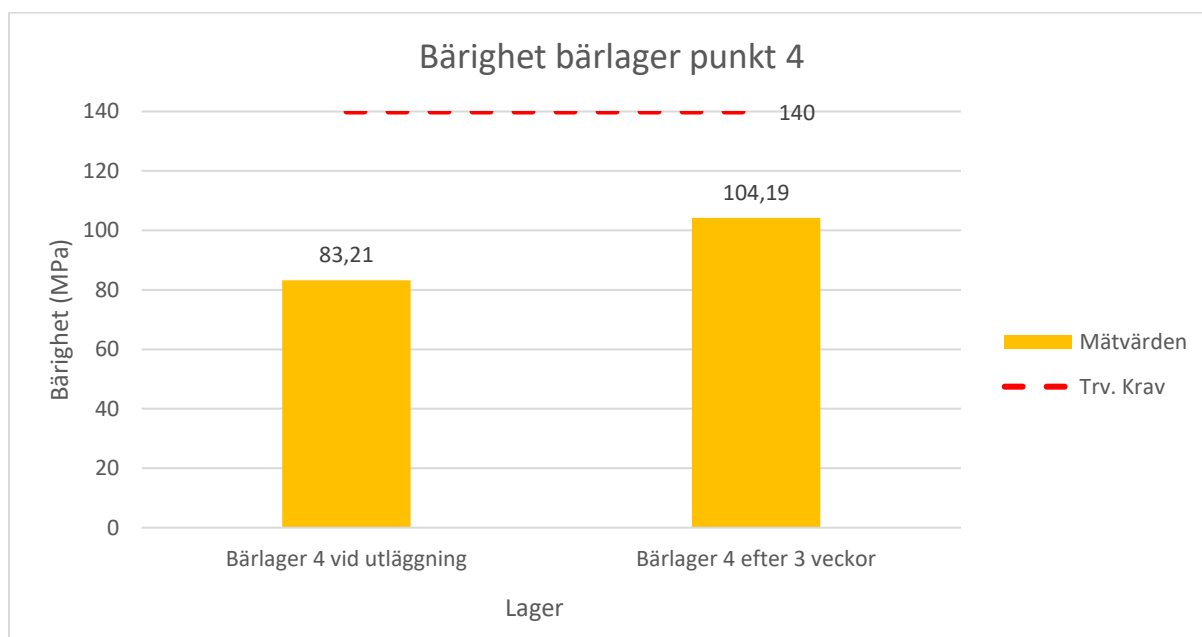
Även här syns en bärighetstillväxt vid mätningarna tre veckor efter utläggning, med en ökning på 23,09 MPa (44,5 %) för punkt 3 och 20,98 MPa (25,2 %) för punkt 4. Resultaten för detta visas i tabell 18 och figur 36 och 37. Precis som för ytan med betongkross har också bärighetskvoten minskat efter tre veckor, dock inte riktigt till en nivå som understiger Trafikverkets maxkrav, vilket också visas i tabell 18.

Tabell 18. Jämförelse mellan bärlagret i punkt 3 och 4 vid utläggning och efter tre veckor. BL = bärlager.

	Asfaltgranulat					
	Punkt 3		Punkt 4		Trafikverkets krav	
	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet min. (MPa)	Bärighetskvot max.
BL (vid utläggning)	51,91	-	83,21	3,42	140	2,8
BL (efter 3 veckor)	74,90	2,97	104,19	2,86	140	2,8



Figur 36. Jämförelse mellan bärlagret i punkt 3 vid utläggning och efter tre veckor. Trv = Trafikverket.



Figur 67. Jämförelse mellan bärlagret i punkt 4 vid utläggning och efter tre veckor. Trv = Trafikverket.

5.3. Bergkross

På provytan med bergkross finns mätpunkterna 5 och 6. Ytan består nedifrån av en lerterrass, förstärkningslager med 320 mm bergkross 0–90 och bärlager med 80 mm bergkross 0–40. På terrassen för punkt 5 och 6, samt på förstärkningslagret för punkt 6 kunde inte E_{V1} beräknas, vilket gör att det inte finns någon bärighetskvot för dessa punkter.

5.3.1 Bärighet

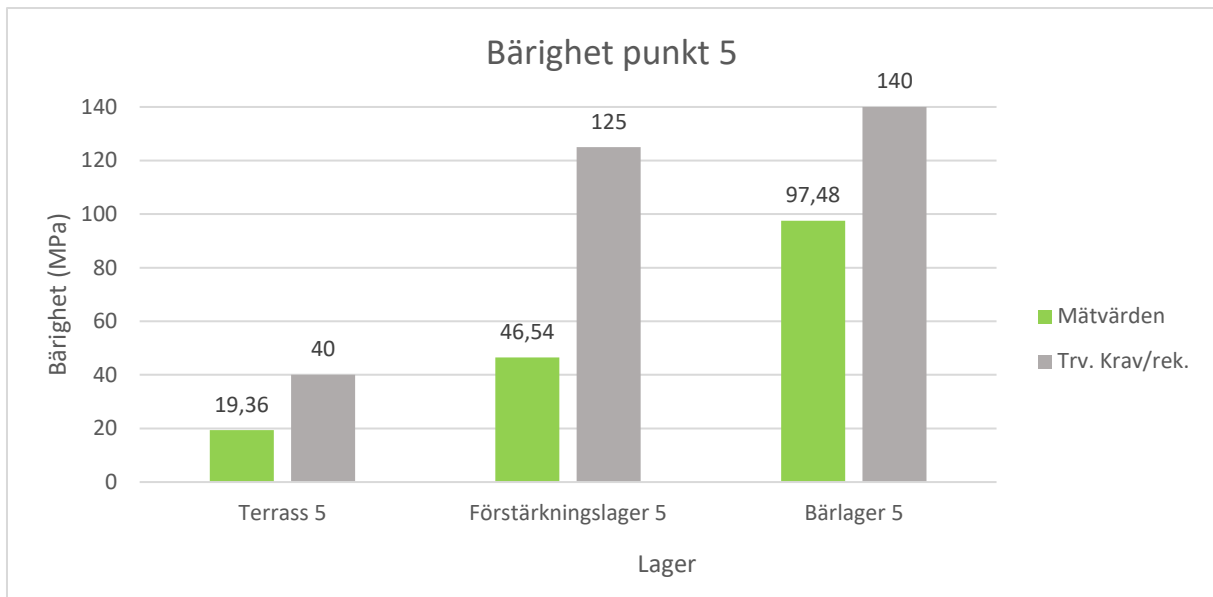
Trafikverkets krav uppnås inte heller för någon av testpunkterna på bergkrossytan, på något av lagren. När det gäller bärighetsökningen från förstärkningslagret är den relativt lika för båda punkterna, med en dryg fördubbling för punkt 5 (ökning med 27,18 MPa, 140 %) och punkt 6 (ökning med 29,18 MPa, 141 %). Även här har bärlagret en tydligare effekt än på betongkrossytan, med en ökning av bärigheten på 50,94 MPa (109 %) för punkt 5 och 29,68 MPa (59,5 %) för punkt 6. Resultaten för provpunkt 5 och 6 visas i tabell 19 och figur 38 och 39.

5.3.2. Bärighetskvot

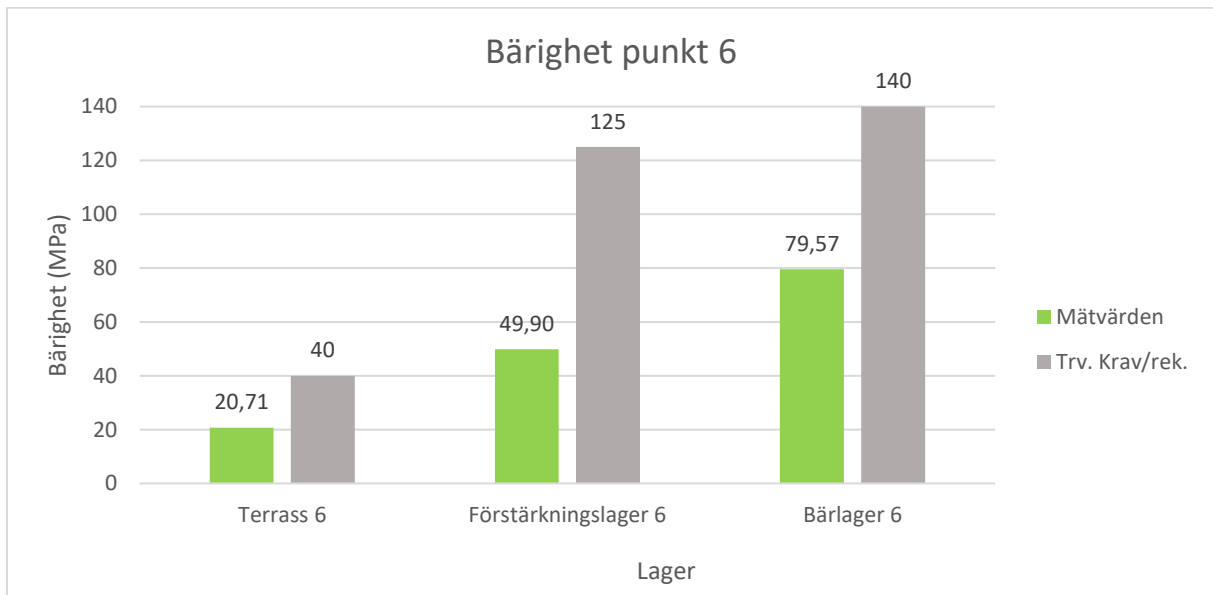
Kravet på bärighetskvot är här uppfyllt i en av punkterna, i bärlagret på punkt 5. I resterande två punkter där kvoten kunde beräknas uppfylls inte kraven, vilket även här tyder på att packningsarbetet skulle kunna göras bättre. Detta visas i tabell 19.

Tabell 19. Översikt över mätpunkt 5 och 6 på provytan med bergkross. För terrass och bärlager gäller krav från Trafikverket medan det för förstärkningslagret är rekommendationer. FL = förstärkningslager, BL = bärlager.

	Bergkross					
	Punkt 5		Punkt 6		Trafikverkets krav/rek.	
	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet (MPa)	Bärighetskvot	Bärighet min. (MPa)	Bärighetskvot max.
Terrass	19,36	-	20,71	-	40	-
FL	46,54	4,52	49,89	-	125	3,5
BL	97,48	2,70	79,57	3,34	140	2,8



Figur 38. Diagram som visar hur bärigheten ökar för varje lager i punkt 5. För terrass och bärlager gäller krav från Trafikverket medan det för förstärkningslagret är rekommendationer. Trv = Trafikverket, rek = rekommendationer.



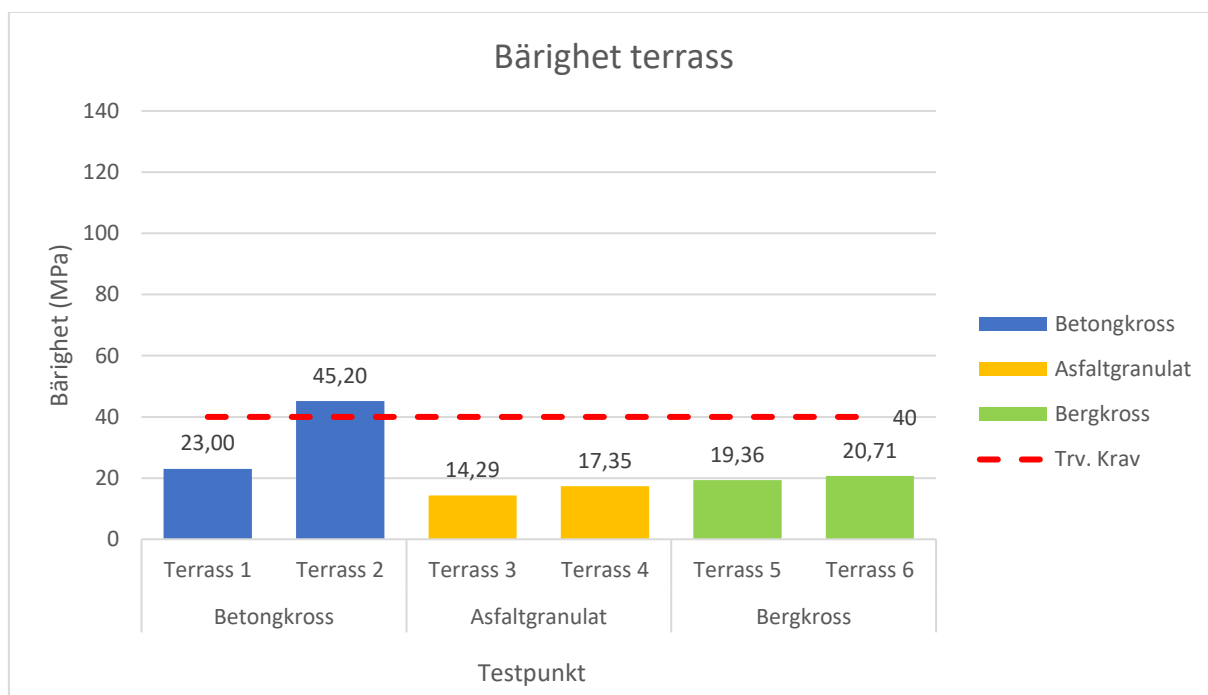
Figur 39. Diagram som visar hur bärigheten ökar för varje lager i punkt 5. För terrass och bärlager gäller krav från Trafikverket medan det för förstärkningslagret är rekommendationer. Trv = Trafikverket, rek = rekommendationer.

5.4. Jämförelse mellan provytorna

I detta avsnitt görs en jämförelse mellan de olika provytornas bärighetsvärden samt värden för bärighetskvot, först vid utläggningen och sedan för mätningen efter tre veckor.

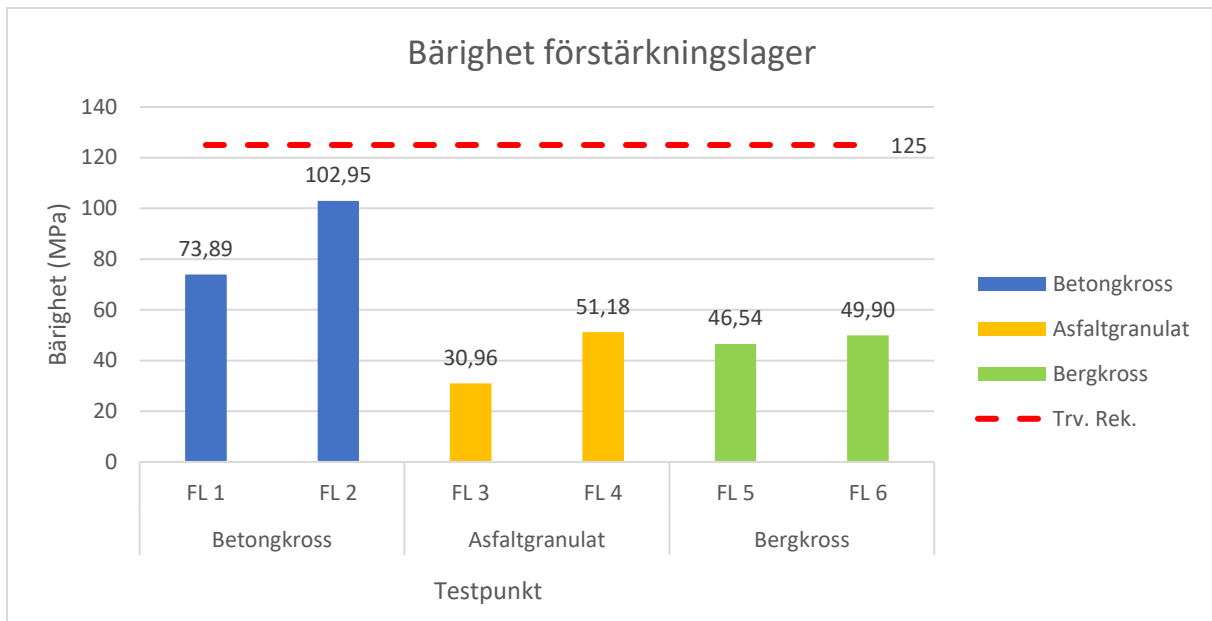
5.4.1. Bärighet

Jämförelser mellan de olika punkterna på terrassen visar att bärighetsvärdena är relativt lika med små variationer, bortsett från punkt 2 som är ungefär dubbelt högt som övriga punkter. Detta visas i figur 40.



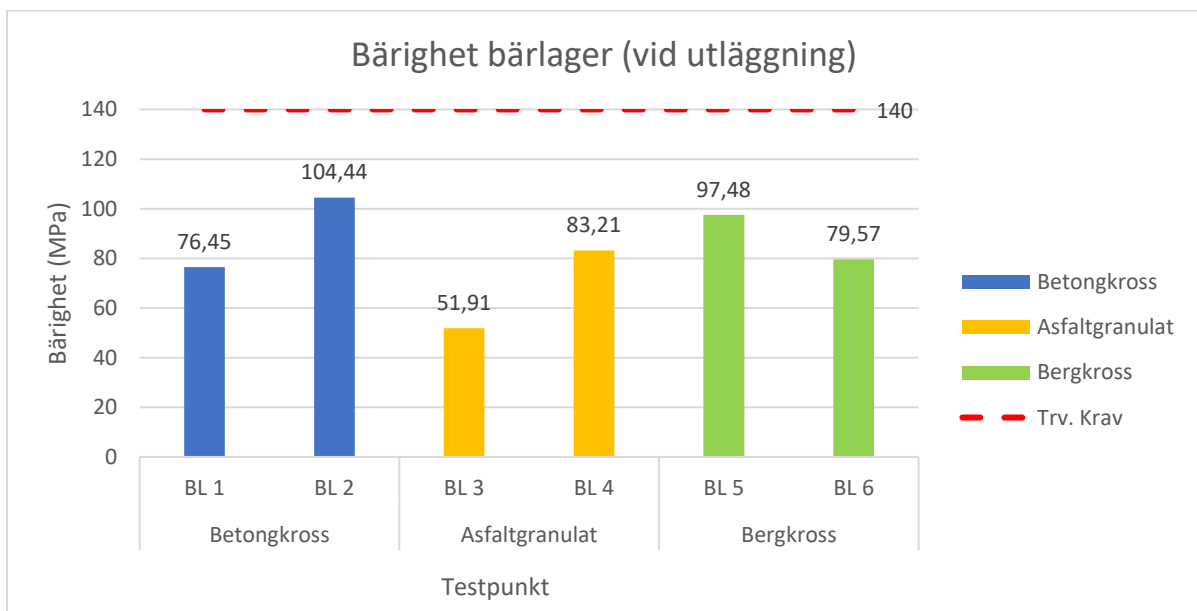
Figur 40. Jämförelse av de olika mätpunkternas bärighet på terrassen. Trv = Trafikverket

På förstärkningslagret är variationerna desto större, där mätpunkt 1 och 2 har förstärkningslager av betongkross medan punkt 3–6 har bergkross. Där syns det att de två punkterna på ytan med betongkross får klart högre värde på bärigheten, vilket alltså även gäller punkt 1 som hade liknande terrassvärde som övriga punkter. Punkt 3–6 som alla innehåller bergkross får relativt lika värden, med undantag för punkt 3 som ligger ganska långt under övriga punkter. Detta kan ses i figur 41.



Figur 41. Jämförelse av de olika mätpunkternas bärighet på förstärkningslagret. Trv = Trafikverket, rek = rekommendationer, FL = förstärkningslager

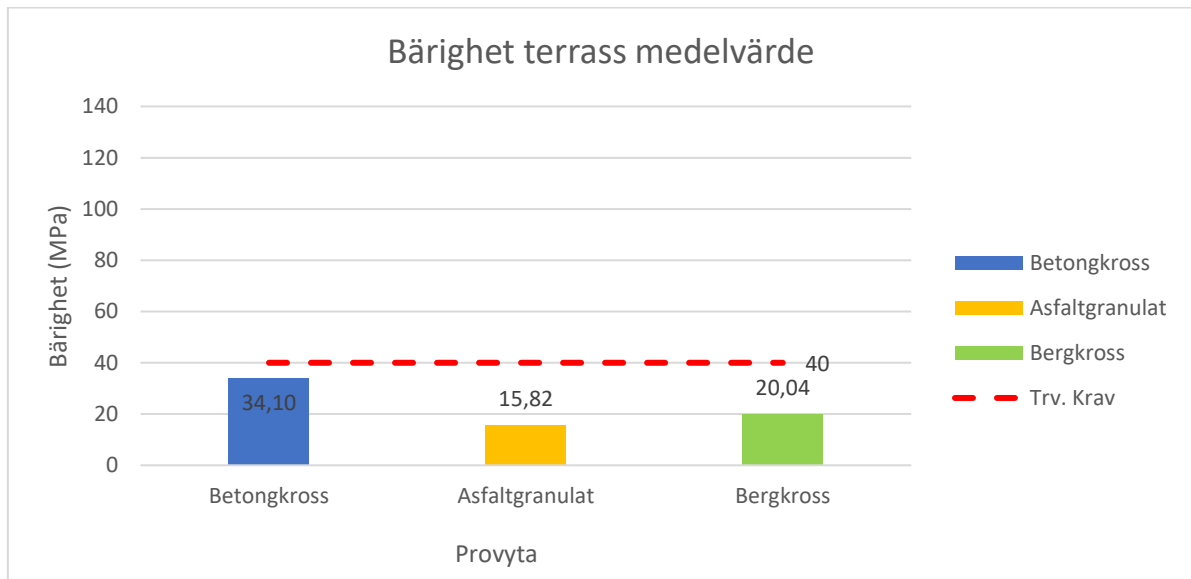
I bärlagret innehåller punkt 1–4 REform och punkt 5 och 6 enbart bergkross. Resultaten här visar att bärlagret på ytan med betongkross är den som ger minst bärighetsökning jämfört med förstärkningslagret, vilket leder till att bärigheten för ena punkten på asfaltgranulatytan och båda punkterna på bergkrossytan nu överstiger bärigheten för punkt 1 med betongkross. Undantaget är punkt 3 på asfaltgranulatytan som fortfarande befinner sig en bra bit under övriga punkter, medan punkt 2 på betongkrossytan fortfarande befinner sig något över övriga punkter. Data för bärlager visas i figur 42.



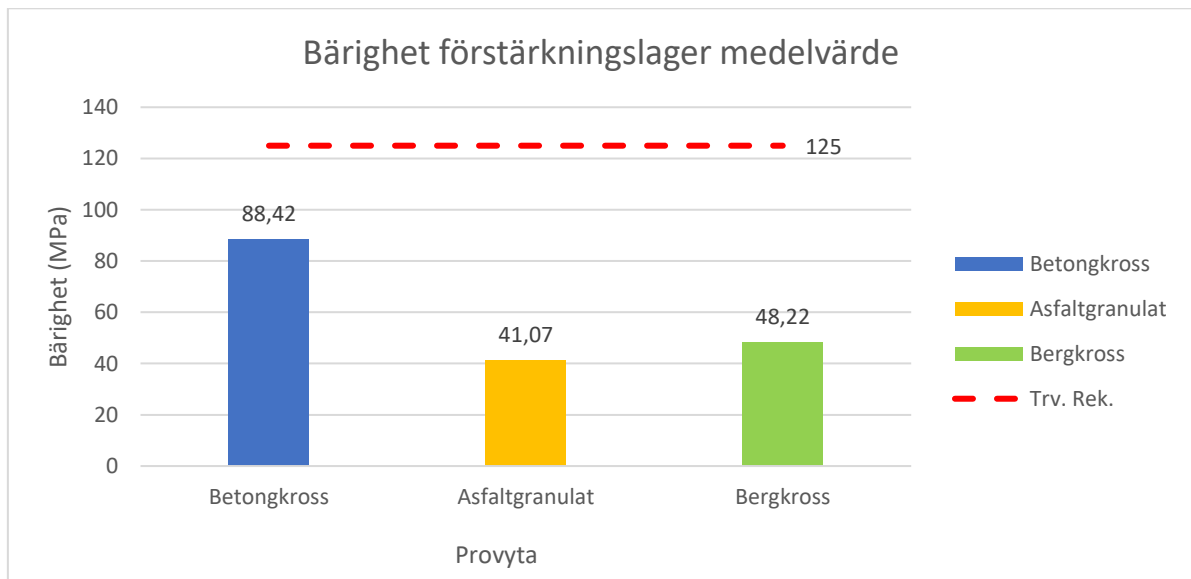
Figur 42. Jämförelse av de olika mätpunkternas bärighet på bärlagret vid utläggning. Trv = Trafikverket, BL = bärlager.

Det beräknas även ett medelvärde av de två punkterna på varje provyta, för att undersöka om det ger någon annan information än resultaten ovan. Medelvärdena visar dock liknande tendenser som ovan, betongkrossytan har klart högre värden än övriga två ytor på

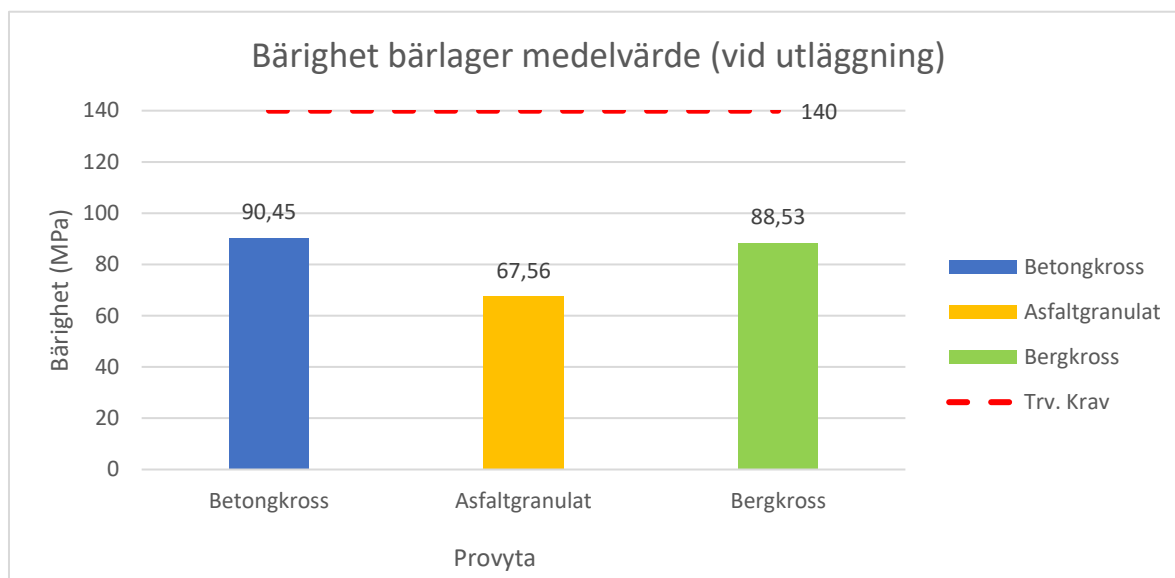
förstärkningslagret, men skillnaden jämnas sedan ut när bärlagret sedan läggs på. Väl på bärlagret är bärighetens medelvärde relativt lika för de tre ytorna, med asfaltgranulatytan på en något lägre nivå än övriga två. Medelvärdena för de olika lagren visas i figur 43–45.



Figur 43. Jämförelse av medelvärdet (av två punkter) på de tre provytornas bärighet på terrassen. Trv = Trafikverket.



Figur 44. Jämförelse av medelvärdet (av två punkter) på de tre provytornas bärighet på förstärkningslagret. Trv = Trafikverket, rek = rekommendationer.



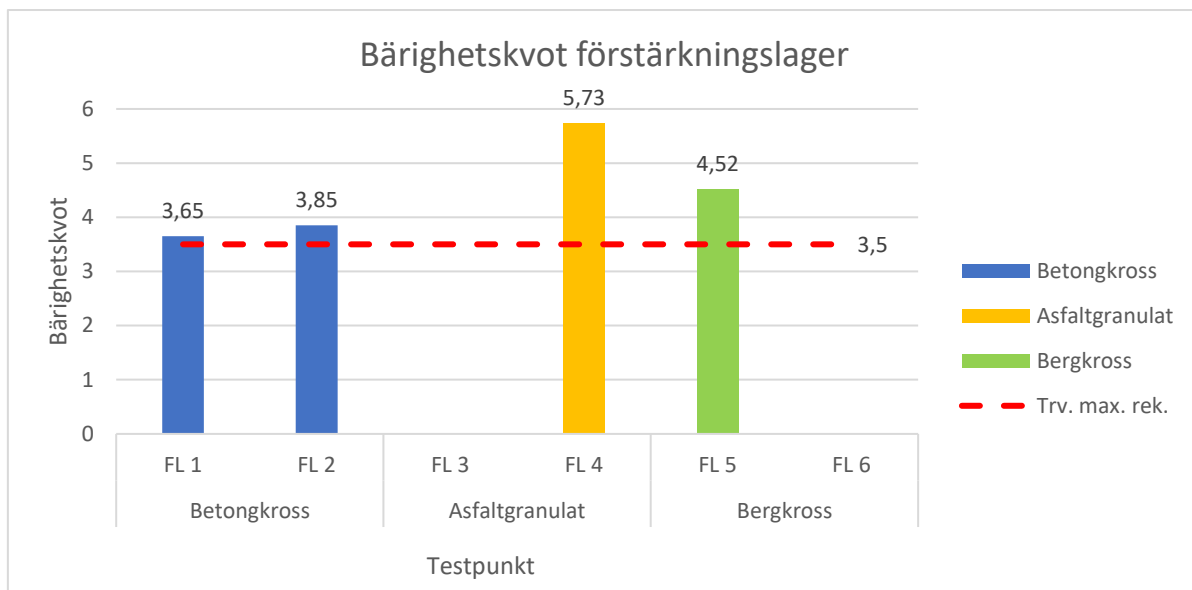
Figur 45. Jämförelse av medelvärdet (av två punkter) på de tre provytornas bärighet på bärlagret vid utläggning. Trv = Trafikverket.

5.4.2. Bärighetskvot

När det kommer till bärighetskvot görs en jämförelse mellan materialen för att se om något material är mer lättpackat än andra. När det kommer till terrassen görs inga jämförelser av tre anledningar:

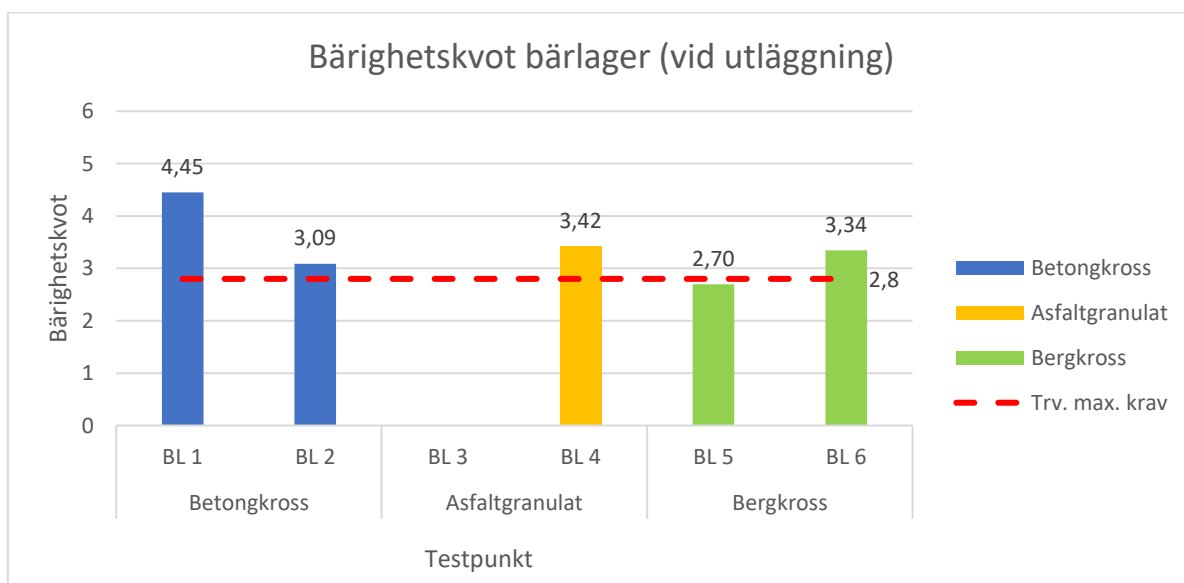
1. Det är ingen materialskillnad i de olika terrasspunkterna.
2. Det finns inga krav eller rekommendationer för bärighetskvot på terrassen.
3. Det är bara för en av testpunkterna som en bärighetskvot har kunnat beräknas, vilket gör att en jämförelse inte är möjlig.

För förstärkningslagret finns fyra punkter där en bärighetskvot har kunnat beräknas. Resultaten där visar att lagren av betongkross (punkt 1 och 2) har lägre kvot än de övriga två punkterna, och är nära att uppfylla Trafikverkets rekommenderade värde på max 3,5. Både punkt 4 & 5, som båda har bergkross i förstärkningslagret, har högre värde som ligger klart över Trafikverkets maxrekommendation, vilket framgår av figur 46.



Figur 46. Jämförelse av testpunkternas bärighetskvot på förstärkningslagret. Trv = Trafikverket, rek = rekommendationer, FL = förstärkningslager.

För bärlagret skiljer sig resultatet något från förstärkningslagret, där är det punkt 5 (bergkross) som har lägst bärighetskvot, och klarar sig under Trafikverkets krav på maxvärdet 2,8. Övriga kvoter ligger relativt jämnt strax över 3, med undantag för punkt 1 som ligger klart över de andra på 4,45. Detta finns redovisat i figur 47.



Figur 47. Jämförelse av testpunkternas bärighetskvot på bärlagret vid utläggning. Trv = Trafikverket, BL = bärlager.

5.4.3. Tre veckor efter utläggning

Även detta avsnitt delas upp i en del som behandlar bärighet och en del som behandlar bärighetskvot.

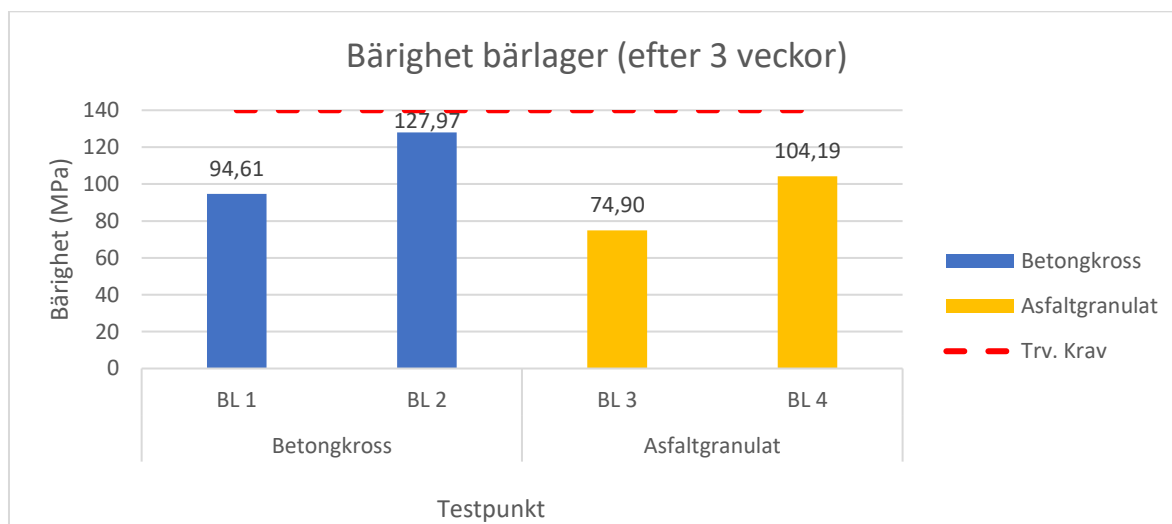
5.4.3.1. Bärighet

Mätningarna tre veckor efter utläggning visar en bärighetstillväxt på bärlagret för både ytan med betongkross och asfaltgranulat. Det finns ingen större skillnad sett till inbördes

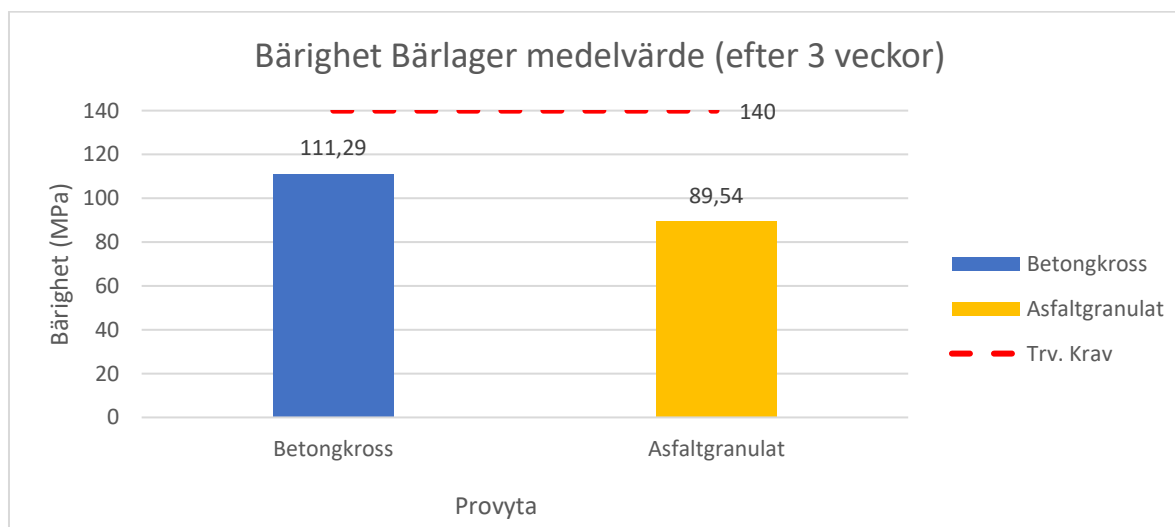
jämförelser mellan mätpunkterna, då bärlighetstillväxten är ungefär lika stor för punkterna 1–4. Punkt 3 sticker dock ut något sett till procentuell ökning, med en bärlighetsökning på 44,5 % jämfört med 22–26 % för övriga tre punkter. De uppmätta bärligheterna kan ses i tabell 20 och figur 48. Även här beräknades ett medelvärde för de två materialen, vilket visade att betongkrossytan har något bättre bärlighet än asfaltgranulatytan. Detta visas i figur 49.

Tabell 20. Bärlighetsvärden för bärlagret tre veckor efter utläggning, samt bärlighetsökning jämfört med utläggning.

Betongkross				Asfaltgranulat			
Punkt 1		Punkt 2		Punkt 3		Punkt 4	
Bärlighet (MPa)	Ökning (MPa)	Bärlighet (MPa)	Ökning (MPa)	Bärlighet (MPa)	Ökning (MPa)	Bärlighet (MPa)	Ökning (MPa)
94,61	18,16 (23,8 %)	127,97	23,53 (22,5 %)	74,90	23,09 (44,5 %)	104,19	20,98 (25,2 %)



Figur 48. Jämförelse av de olika mätpunkternas bärlighet på bärlagret tre veckor efter utläggning. Trv = Trafikverket, BL = bärlager



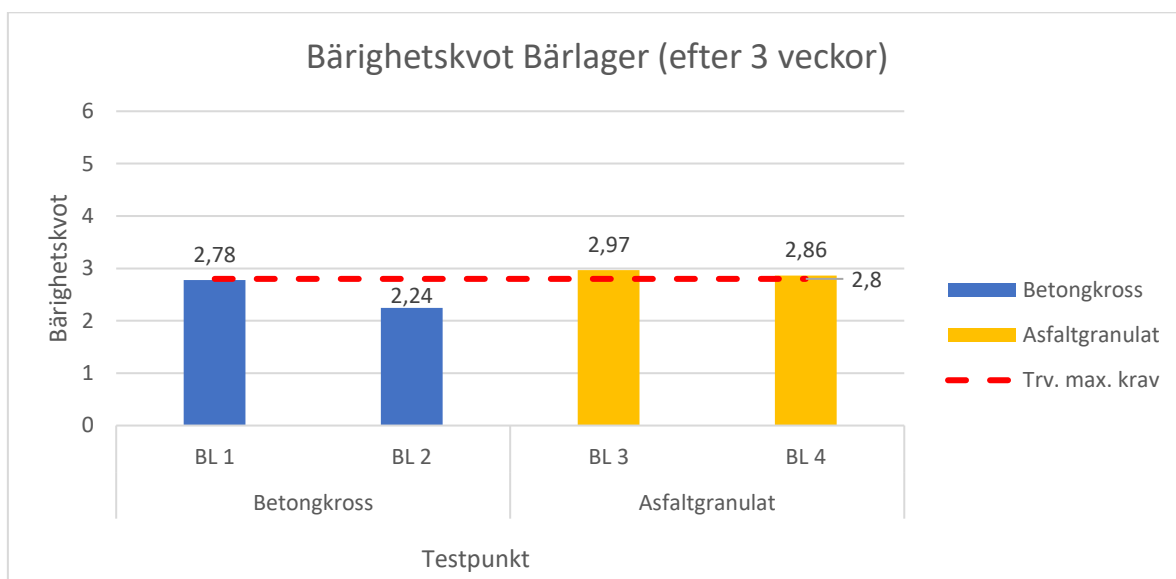
Figur 49. Jämförelse av medelvärdet (av två punkter) på provytornas bärlighet på bärlagret tre veckor efter utläggning. Trv = Trafikverket.

5.4.3.2. Bärighetskvot

Efter tre veckor har bärighetskvoterna sjunkit markant för samtliga uppmätta punkter, men främst för punkt 1 och 2 på ytan med betongkross, där båda punkterna nu klarar sig under Trafikverkets krav på 2,8. Trots att punkt 4 också har sjunkit ligger den fortfarande strax ovanför denna gräns. Punkt 3 har ingen tidigare bärighetskvot att jämföra med, men dess kvot efter tre veckor är likvärdig med punkt 4, om än lite högre. Detta visas i tabell 21 och figur 50.

Tabell 21. Bärighetskvoter för bärlaget tre veckor efter utläggning, samt minskning av kvot jämfört med utläggning.

Betongkross				Asfaltgranulat			
Punkt 1		Punkt 2		Punkt 3		Punkt 4	
Kvot	Minskning	Kvot	Minskning	Kvot	Minskning	Kvot	Minskning
2,78	1,67 (-37,5 %)	2,24	0,85 (-27,5 %)	2,97	-	2,86	0,56 (-16,4 %)



Figur 50. Jämförelse av testpunkternas bärighetskvot på bärlaget tre veckor efter utläggning. Trv = Trafikverket, BL = bärlager

6. Diskussion

Detta kapitel ämnar diskutera resultaten från fältförsöket, samt arbetets frågeställningar med stöd av teorin och fältundersökningarna. Kapitlet behandlar först observationer från fältförsöket, sedan betongkross och asfaltgranulat var för sig, andra återvunna material och slutligen en utvärdering av arbetets metod.

6.1. Resultatdiskussion

Resultatdiskussionen delas upp i ett avsnitt med observationer från mätningarna vid utläggning och ett om mätningarna efter tre veckor.

6.1.1. Resultat vid utläggning

Resultaten från fältförsöket visar att ingen av testpunkterna på förstärknings- eller bärlagret når upp till Trafikverkets krav eller rekommendationer. Detta var dock något som kunde förväntas eftersom förstärkningslagrets tjocklek endast var 320 mm istället för det normala 420 mm. Med en normal tjocklek på förstärkningslagret hade bärigheten med stor sannolikhet blivit högre för samtliga testpunkter, men hur mycket högre är svårt att svara på.

Jämförelsen mellan provytorna gav en hel del intressanta resultat. På förstärkningslagret var det tydligt att betongkrossen hade en större effekt för bärigheten än vad förstärkningslagret bestående av stenkross hade. Vad detta beror på är inte helt självklart, men en förklaring kan vara att betongkrossen är lättare att packa, något som indikeras av att båda punkterna på betongkrossytan hade klart lägre bärighetskvot än övriga punkter på förstärkningslagret.

På bärlagret var det istället på betongkrossytan som bärlagret bidrog till klart minst bärighetsökning av de tre materialen. Detta är intressant då bärlagret består av samma material som på asfaltgranulatyten, men där hade bärlagret betydligt större effekt på bärigheten. På testpunkt 1 går detta att härleda till en hög bärighetskvot, men för punkt 2 är det svårare att hitta en orsak då dess bärighetskvot är näst lägst av alla testpunkter. En möjlig anledning är att bärlagret har packats så pass hårt att bärigheten i förstärkningslagret har försämrats, något som är en risk vid användning av betongkross.

Bärlagren på asfaltgranulatyten och bergkrossytan har relativt lika effekt på bärigheten, vilket även sammanfaller med att bärighetskvoterna för dessa punkter är snarlika. Det stora undantaget är punkt 5 på bergkrossytan som har en större bärighetsökning än de andra punkterna på dessa två ytor, vilket även sammanfaller med en klart lägre bärighetskvot som är lägst av samtliga punkter och den enda som understiger Trafikverkets maxkrav. Även detta tyder på att packningen och bärighetsökningen är starkt korrelerade.

En utvärdering av de faktiska bärighetsvärdena istället för bara ökningen per lager, visar att ett förstärkningslager med betongkross har klart högre bärighet än ett förstärkningslager av bergkross, där medelvärdet av betongkrosspunkternas bärighet uppnår ungefär dubbla värdet av bergkrossens. Detta förstärker teorin om att betongkross är ett material som gör sig bäst i förstärkningslager snarare än bärlager. Uppe på bärlagret är inte skillnaderna lika

tydliga, där är värdena för betongkross- och bergkrossytan snarlika, medan bärigheten för asfaltgranulat är en bit lägre.

Det bör dock beaktas en del försiktighet när slutsatser dras utifrån detta resultat. Detta beror på att endast två punkter per provyta har testats. Med fler provpunkter blir medelvärdet mer pålitligt, och extremvärden blir lättare att urskilja och ifrågasätta. I dessa mätningar finns det testpunkter som bör ifrågasättas, som kan ha gjort att resultatet blir något missvisande. Terrassen i punkt 2 på betongkrossytan har dubbelt så hög bärighet som övriga provpunkter på terrassen. Punkt 2 är även den punkt som har högst bärighetsvärden på övriga lager, även klart högre än den andra betongkrosspunkten, punkt 1. Med stor sannolikhet kan detta härledas tillbaka till terrassen, vilket gör att betongkrosset kan få högre värden än vad materialet i sig själv egentligen bidrar till. Det motsatta gäller för punkt 3 på ytan med asfaltgranulat som har en relativt låg bärighet på terrassen och sedan genomgående uppvisar klart sämre bärighet än punkt 4 som består av samma material. Här väcks också misstankar om att något har blivit fel med antingen material eller mätning, som gör att asfaltgranulat får ”oförtjänt” sämre medelvärden än de andra materialen. En osäkerhet som hade kunnat elimineras med hjälp av fler mätningar.

6.1.2. Resultat tre veckor efter utläggning

Att det sker både en bärighetsökning och en minskning av bärighetskvoten efter tre veckor indikerar att materialet har packats hårdare av trafikbelastningen, och på grund av detta fått en högre bärighet, något som stämmer väl överens med teorin. Bärighetsökningarna efter tre veckor för de fyra uppmätta punkterna var relativt lika storleksmässigt, men något större procentuellt för punkt 3 på grund av dess sen tidigare låga bärighet. Detta visar tydligt att bärigheten ökar markant efter relativt kort tids trafikering. Minskningen i bärighetskvot skiljer sig mer, där båda punkterna på betongkrossytan har en markant större minskning och dessutom en lägre kvot som slutresultat. Både betongkross och asfaltgranulat har som tidigare beskrivits en efterbindande effekt, och det är svårt att avgöra hur mycket av bärighetsökningen som beror på denna effekt och hur mycket som beror på att materialet bara har packats bättre. Det är därför olyckligt att dessa mätningar inte kunde göras på stenkrossytan, där en bättre jämförelse hade kunnat göras med ett material som inte har denna efterbindningseffekt.

Att bärighetsutvecklingen över tid är så snarlik för betongkross- och asfaltgranulatyten indikerar att dessa material beter sig relativt lika när det kommer till bärighetsökning beroende av efterpackning från trafikbelastning. Det kan vara en nyttig lärdom i andra sammanhang när materialen används, exempelvis om man bara har data från det ena materialet och vill kunna förutspå effekter på det andra. Detsamma gäller dock inte för bärighetskvoten, vilket tyder på att betong packas tätare av trafikbelastningen, men att det inte verkar ge så stor effekt på bärighetstillväxten.

Även denna jämförelse är svår att dra allt för starka slutsatser från, återigen då mätpunkterna är få, men också för att lagren innehåller olika material. Detta är en svårighet eftersom det inte bara är bärlagret som får en efterpackning och bärighetstillväxt, utan bärlagret fördelar lasten neråt till förstärkningslagret som också får dessa effekter, om än i mindre grad än bärlagret. Förstärkningslagret i sin tur fördelar lasterna vidare ner till terrassen, som även den efterpackas, dock i ännu mindre grad. Därför är det svårt att veta

exakt hur mycket varje lager och material bidrar till bärighetsökningen i konstruktionen. Det är något som skulle kunna vara intressant för framtida forskning att titta på, att med mätsensorer på de olika lagren få fram hur stor effekten av efterpackning är på varje lager.

6.2. Krossad betong

I detta avsnitt följer en diskussion om betongkross baserat på teorin och de praktiska försöken som utförs. Diskussionen har sitt fokus på arbetets frågeställningar.

6.2.1. Bärighet

Den samlade bedömning som kan göras utifrån teorin är att krossad betong är minst lika bra som bergkross när det kommer till användning i förstärkningslagret. Redan vid utläggning är bärigheten likvärdig och betongkrossets efterbindande egenskaper gör dessutom att styvheten kan öka kraftigt med tiden. Denna effekt förstärks också av ett tjockare lager, vilket är en anledning till att betongkross utnyttjas bäst i det tjockare förstärkningslagret. I bärlagret är användningen av betongkross mer komplicerad. Enligt Trafikverkets regelverk får materialet i dagsläget inte användas i bärlagret på vägar med biltrafik, vilket beror på nedkrossningsrisken och den höga vattenabsorptionen hos materialet som bidrar till ökad risk för saltinträngning. Dessa problem nämns dock inte i den internationella litteratur som använts i detta arbete, där betongkross istället nämns som ett bra alternativ även till bärlager. Detta skulle kunna vara ett incitament för att omvärdera Trafikverkets standarder gällande betongkross i bärlager.

Resultaten från fältundersökningarna pekar åt samma håll som teorin. Där går det att se att båda punkterna med betongkross i förstärkningslagret fick markant högre bärighet på förstärkningslagret än resterande punkter med bergkross, och detta alltså redan vid utläggning innan någon efterbindning hade kunnat ske. De två punkterna uppvisar dessutom en lägre bärighetskvot än de andra, vilket skulle kunna vara ett tecken på att materialet är mer lätthanterligt när det gäller packning. Bärlagret på betongkrossytan visade inte samma positiva resultat, där bärlagret inte alls ledde till en lika stor bärighetsökning som bärlagret gjorde på de två andra provytorna. Visserligen innehöll inte detta bärlager betongkross, men eftersom samma bärlager användes på asfaltgranulatyten med klart större bärighetsökning, är det ändå intressant. Vad detta beror på är svårt att säga, en möjlig anledning skulle kunna vara packningen, något som kan härledas till den höga bärighetskvoten i punkt 1, men den teorin håller inte för punkt 2 som både har låg kvot och låg bärighetsökning. En mer trolig anledning är i så fall att bärlagret har packats för hårt, vilket har lett till minskad bärighet i förstärkningslagret, något som har tagits upp som en risk vid användning av betongkross. Detta behöver styrkas i fler försök för att kunna bekräftas, men är ändå en viktig aspekt att ta hänsyn till vid användning av betongkross i förstärkningslagret.

Den ökade bärigheten samt minskade bärighetskvoten som uppmättes tre veckor efter utläggning tyder på att materialet packas ytterligare vid trafikering, vilket bidrar till bättre packningsgrad och ökad bärighet. Som tidigare nämnt är det svårt att veta exakt hur mycket av detta som beror på betongkrossen i förstärkningslagret, men det är rimligt att anta att även betongkross gynnas av denna efterpackning. Detta visar hur viktigt det är med packningsarbetet för att få ut det mesta möjliga av materialets bärighet.

6.2.2. Stabilitet

Stabilitet har inte testats under fältförsöken utan diskussionen kring denna baseras enbart på teorin. Stabilitetsegenskaperna hos krossad betong är likvärdiga de för bergkross och i vissa fall även bättre. Problemet med materialet är att detta endast gäller upp till en belastning på ungefär 1,2 MPa, varefter materialet löper stor risk för nedkrossning vilket försämrar stabiliteten. Påkänningarna från trafiklast blir högre desto högre upp i konstruktionen ett material ligger, vilket bidrar till problematiken med att använda betongkross i bärlagret på vägar med biltrafik. Det fungerar dock bra som bärlager på gång- och cykelvägar, och det skulle vara intressant att undersöka om det skulle kunna gå att använda i bärlager på lågtrafikerade bilvägar med endast en liten andel tunga fordon. Om inte enbart med betongkross så åtminstone i en blandning av berg- och betongkross för att öka stabiliteten något.

6.2.3. Klimat- och miljöpåverkan

Klimat- och miljöpåverkan av bergkross kommer främst från brytningen av materialet, där det är en ändlig resurs som används som dessutom är viktig för reningen av grundvatten. Det kräver också stora ingrepp i natur och landskapsbild vid uppförandet av bergtäkter. Arbete med bergtäkter kan dessutom ha negativ påverkan i form av buller och vibrationer som stör djur och människor, utsläpp av damm, partiklar och föroreningar från arbetsfordon och sprängningar, grundvattensänkningar samt förorening av grundvattnet i form av oljespill eller andra utsläpp. Dessa problem elimineras när material återvinns istället för att nytt material bryts. En annan viktig faktor är utsläppen från transporter. Om den återvunna betongen kan rivas och återvinnas närmare platsen där den nya vägen ska byggas än bergtäkten, finns det möjligheter att spara in på transporter och därmed minska klimatpåverkan från transportutsläpp. Eftersom bergtäkter placeras allt längre ifrån byggarbetsplatser och byggnader som rivs förmodligen ligger närmare i de flesta fall, borde det finnas god potential för detta.

Förutom besparingarna som görs när brytningen av nytt material undviks, är det också viktigt att titta på vilken klimat- och miljöpåverkan betongkrossen har som material. Den största påverkan från betong ligger i produktionen av cement, som motsvarar 2–3 % av Sveriges koldioxidutsläpp per år. Kanske borde det därför vara aktuellt att hitta något alternativt material till det, men så länge betongen redan har producerats, kan och bör den också återvinnas. Eftersom utsläppen från produktionen inte behöver beaktas vid användning av återvunnen betong, är det främst själva användningen fokus bör ligga på. Klimat- och miljöpåverkan från betongkross är kopplat till mängden främmande ämnen som förorenar betongen. Viktigt när betongkross används är därför att det finns goda kunskaper om vad betongen innehåller, kvaliteten på betongen, var och hur den har använts tidigare, samt att reningsprocessen utförs med noggrannhet. Reningsprocessen är viktig för att ta bort hälso- och miljöskadliga ämnen som kvicksilver, asbest, PCB, PAH och CFC, samt metaller som bly och koppar som lätt kan urlakas annars.

För att underlätta användningen av betongkross är det därför viktigt att det planeras för återvinning i ett tidigt skede, exempelvis med god dokumentation vid byggskedet för att enklare kunna fastställa vad betongen innehåller och hur den bör hanteras när det väl är dags för återvinning.

6.2.4. Slutdiskussion för betongkross

Sett till bärighets- och stabilitetsegenskaper är betongkross ett minst lika bra alternativ till förstärkningslagret som bergkross. Detta visas redan vid utläggning och den efterbindande effekten gör att dessa egenskaper dessutom blir bättre med tiden. Som bärlager finns det en del frågetecken med tanke på känsligheten för nedkrossning och saltinträngning, problem som dock kan åtgärdas genom tätare bundna lager ovanför bärlagret, samt att endast använda det på gång- och cykelvägar med låga belastningar. Att materialet används i bärlager utomlands gör att det dock skulle vara intressant att undersöka huruvida det går att omvärdera Trafikverkets regler om att det inte får användas i bärlager på vägar med biltrafik. Ett första steg skulle kunna vara att testa det i större skala på lågtrafikerade vägar, kanske i blandning med bergkross.

Klimat- och miljömässigt görs den största vinsten genom att nytt material inte behöver brytas, samt att transporterna kan minska ifall återvinningen kan ske närmare den nya vägen än vad bergtäkterna ligger. Risken för negativ påverkan på klimat och miljö vid användning av betongkross bör elimineras genom god kontroll på materialets egenskaper, ursprung och komponenter, vilket kan möjliggöras med goda förberedelser och dokumentation redan vid byggskedet när betongen används för första gången.

6.3. Asfaltgranulat

I detta avsnitt följer en diskussion om asfaltgranulat baserat på teorin och de praktiska försöken som utgörs. Diskussionen har sitt fokus på arbetets frågeställningar.

6.3.1. Bärighet

Även för asfaltgranulat pekar teorin på att materialet är likvärdigt bergkross bärighetsmässigt, och bärigheten för asfaltgranulat kan till och med bli 10–30 % bättre än för bergkross. Precis som betongkross har även asfaltgranulat en efterbindande effekt som gör att bärigheten ökar med tiden, vilket ger materialet ytterligare övertag gentemot bergkross. Asfaltgranulat kan användas i både bär- och förstärkningslager på såväl bil- som cykelvägar, men det som komplicerar användningen är att materialet inte kan läggas ut i tjockare lager än 150 mm om det ska gå att packa ordentligt. Vid användning i förstärkningslager, som är tjockare än 150 mm, måste därför materialet läggas ut i flera skikt, något som kan kosta både tid och pengar för ett projekt. Detta gör materialet mer lämpligt att använda i bärlagret, som normalt endast är 80 mm tjockt.

I fältundersökningen användes asfaltgranulat endast i bärlagret, vilket gör att det endast är där jämförelser kan dras med andra material. Dessutom var det inte enbart asfaltgranulat i lagret, utan en blandning av 30 % asfaltgranulat och 70 % bergkross. Resultatet visar att den ena punkten på ytan med asfaltgranulat fick liknande bärighetsvärden som ytorna med betong- och bergkross, medan den andra punktens värden låg något lägre. Det hade därför behövts fler mätpunkter för att bekräfta sambandet, men det går ändå att se tendenser på att bärigheten för ett lager med asfaltgranulat är relativt likvärdigt med det andra testade materialen. Den bärighetsökande effekten av bärlagret var ungefär samma på asfaltgranulatytan som för bergkrossytan, vilket tyder på att användningen av REform inte tydligt ger andra egenskaper än bara bergkross. Likt betongkrossytan uppmättes även här

en ökning av bärigheten efter tre veckor, vilket förmodligen består av en kombination av efterpackning och den efterbindande effekten hos materialet.

Mätningarna av bärighetskvot försvagas något av att kvoten inte kunde beräknas för punkt 3 vid utläggningen, och att det därför bara fanns en punkt (punkt 4) att titta på. Sett till bärighetskvot är den snäppet högre för asfaltgranulat än de andra materialen, både vid utläggning och efter tre veckor. Som tidigare nämnt är asfaltgranulat ett material vars egenskaper påverkas mycket av packningsarbetet, som behöver göras väldigt noggrant för bästa resultat. Detta kan vara en orsak till att det är svårt att nå ner till samma kvot som för övriga material. Efter tre veckor har dock värdena förbättrats tydligt, och är inte långt ifrån kraven från Trafikverket.

6.3.2. Stabilitet

Stabilitetsegenskaperna är asfaltgranulatets svaga punkt som material, vilket gör att det finns en risk att permanenta deformationer uppstår när materialet används. Därför ska asfaltgranulat inte användas på ytor och vägar där tunga fordon och statiska laster förekommer i hög grad, som till exempel parkeringsytor eller busshållplatser. Stabiliteten försämras främst av hög bindemedelshalt och otillräcklig packning, vilket gör att detta bör tas stor hänsyn till vid användning av asfaltgranulat, exempelvis genom att uppgrävd asfalt används snarare än fräst eftersom den uppgrävda asfalten innehåller mer stenmaterial och mindre bindemedel. Om bindemedelshalten är hög kan det blandas in mer stenmaterial för att sänka halten och på så sätt öka stabiliteten. Ett annat sätt att öka stabiliteten är att låta bärlagret ligga öppet för trafik, för att på så sätt efterpackas innan ovanliggande lager läggs på. Efterpackningen bidrar till att både stabilitet och bärighet ökar.

6.3.3. Klimat- och miljöpåverkan

Precis som för betongkross ligger den största vinsten klimat- och miljömässigt i att nytt bergkrossmaterial inte behöver brytas när återvunnet asfaltgranulat kan användas istället, samt att transporterna kan minska om återvinning kan ske närmare den nya vägen än vad bergtäkterna ligger.

Som material i sig är asfaltgranulat relativt lätt att återvinna, då fräsning och uppgrävning är enkla ingrepp som inte kräver några större resurser. Återvinningen av materialet har i princip ingen negativ påverkan alls. Både när det gäller utsläpp av PAH, eller lakning av ämnen som bly, fenol och mineralolja, så är klimat- och miljöpåverkan från dessa försumbara. Problemet när det kommer till återvinning av asfalt är när asfalten innehåller tjära, ett ämne som har slutat användas sedan länge, men som fortfarande finns kvar i en del svenska vägar. I tjära finns höga halter av PAH, och asfaltgranulat med innehåll av tjära måste därför avskiljas från tjärfri asfalt och hanteras med stor försiktighet enligt specifika riktlinjer och metoder. Dock fungerar även tjärasfalt bra att använda om dessa metoder följs, men det gör såklart hanteringen en aning mer komplicerad. Eftersom tjärasfalt inte används längre kommer detta bli ett allt mindre problem i framtiden, i takt med att nyare, tjärfri asfalt ska återvinnas.

6.3.4. Slutdiskussion för asfaltgranulat

Bärighetsmässigt står sig asfaltgranulat mycket bra mot bergkross, där bärigheten kan bli minst lika bra vid utläggning och dessutom öka med tiden tack vare efterbindning.

Stabilitetsmässigt ser det sämre ut för materialet, som är relativt känsligt för permanenta deformationer, i synnerhet vid höga och statiska laster. Därför är materialet inte lämpligt att använda på ytor där sådana laster förekommer frekvent. Materialet kan dock blandas med andra material som stenmaterial, flygaska eller kanske även betongkross för att öka stabiliteten, vilket ändå gör det till ett intressant alternativ. Det kan användas både i bär- och förstärkningslager, men är mer tids- och resurskrävande än andra material när det kommer till användning i förstärkningslagret, eftersom det måste läggas ut i flera tunnare skikt där för att packningen ska kunna bli väl utförd. Något annat som kan kosta tid är att bärlagret bör ligga öppet ett tag för trafik innan ovanliggande lager läggs på, vilket också är lite till materialets nackdel.

Klimat- och miljömässigt har asfaltgranulat stora fördelar då det är ett enkelt material att återvinna, samt att det endast släpper ut försumbara mängder av skadliga ämnen. Det behöver inte heller genomgå samma noggranna reningsprocess som betongkross. Detta gör asfaltgranulat till ett mycket bra alternativ när det kommer till klimat- och miljöpåverkan. Precis som för betongkross är förberedelser och planering viktigt även när det gäller återvinning av asfalt. Kanske inte redan vid byggskedet som för betong, men återvinningsarbetet kan ha stor effekt på hur bra den återvunna produkten sedan blir. Det är viktigt att planera vad asfaltgranulatet ska användas till och anpassa upptagningen efter det, eftersom fräsning ger bättre granulat för ny asfalt, medan grävning ger bättre granulat för obundet material. Det är också en fördel om lagringen av granulatet kan planeras så att lagringstiden blir så kort som möjligt, att materialet är skyddat från smuts och föroreningar, samt att det inte lagras i för höga upplag, eftersom allt detta kan försämra asfaltgranulatets egenskaper.

6.4. Andra material

Eftersom mängden ballast som används årligen i Sverige kraftigt överstiger mängden återvunnen betongkross och asfaltgranulat per år, är det viktigt att även titta på andra återvunna material som skulle kunna användas som obundet material. Materialen som har undersökts i detta arbete är masugnsslagg/hyttsten, flygaska, skumglas och andra typer av slagg. Av de undersökta materialen kan samtliga användas i förstärkningslager under olika förutsättningar, men endast flygaska och ferrokrosslagg lämpar sig för användning i bärlagret. Men även om materialen inte kan användas som enda komponent i ett lager, finns det fortfarande möjlighet att bruka dem som inblandning med andra material, som till exempel flygaska som kan blandas in i asfaltgranulat för att ge bättre stabilitetsegenskaper. Flera av materialen gör sig dock bäst i annan användning än bär- och förstärkningslager, som skumglas som används som fyllnadsmaterial och tjälisolering eller järnsand som används till skyddslager. När det kommer till klimat- och miljöpåverkan har dessutom flera av materialen lätt lakbara ämnen som försvårar användningen av dem. Bedömningen är att dessa material kan användas till viss del, men det är inte något som kommer kunna ersätta bergkross på längre sikt, framför allt i bärlagret. För att göra det krävs mer forskning på alternativa material med bättre egenskaper och mindre klimat- och miljöpåverkan.

6.5. Metoddiskussion och felkällor

Metoden att använda både teori och praktiska försök bidrar till en djupare förståelse av ämnet och underlättar även möjligheten att se och förstå olika samband som annars kan verka abstrakta när de bara läses i teorin.

Fältförsöket som utfördes hade en del brister som främst grundar sig i tidsbrist och bristande kunskap om hur plattbelastningsundersökningar går till. Bristerna som har upptäckts med fältundersökningarna är följande:

- **Fler provpunkter per provyta och lager borde ha använts för säkrare resultat.**
Detta är för att det i några fall uppstod stora variationer mellan resultaten från samma provyta, och med endast två mätpunkter är det då svårt att avgöra vad som stämmer och ifall något har blivit fel med någon av mätningarna. Kraven från Trafikverket är dessutom baserade på att flera mätningar ska göras så att ett medelvärde med standardavvikelse av de uppmätta deformationsmodulerna ska kunna beräknas. Anledningen till att detta inte gjordes var främst tidsbrist, då mätningarna tar ganska lång tid per mätpunkt och hade dragit ut på tiden för både detta arbete och projektet där mätningarna utfördes.
- **Tätare intervall under första pålastningen borde ha använts.**
Vid majoriteten av mätningarna på terrassen, men även ett fåtal mätningar på förstärknings- och bärlager, nåddes den maximala sättningen på 5 mm redan efter två eller tre laststeg. Detta innebar att det fanns för få mätpunkter under den pålastningen för att kunna beräkna en E_V -modul, något som i sin tur ledde till att en bärighetskvot inte kunde beräknas för dessa punkter. För att undvika detta borde mindre belastningssteg ha använts för att säkerställa att minst fyra värden kunde mätas upp, vilket är det som minst krävs för att E_V -modulen ska kunna beräknas. Anledningen till att detta inte gjordes var att det inte fanns kunskap om att det gick att frånga Trafikverkets förbestämda laststeg, något som framkom efter att mätningarna redan var gjorda.
- **Andra pålastningen borde alltid ha gjorts i sex steg.**
Under mätningarna på terrassen skedde den andra pålastningen endast i fyra steg i de fall första pålastningen fick avbrytas i förtid, enligt instruktioner som fanns tillgängliga tillsammans med resten av plattbelastningsutrustningen. Enligt Trafikverkets metodbeskrivning ska dock den andra pålastningen alltid ske i sex steg, något som upptäcktes inför mätningarna på förstärkningslagret och därefter applicerades. Detta kan ha lett till att värdet på terrassens bärighet är lite mer osäkra än övriga värden, men förmodligen har detta inte alltför stor påverkan på slutresultatet.
- **Mätutrustningen hade inte kalibrerats på länge.**
Detta kan leda till att mätvärdena inte helt stämmer överens med verkligheten. Exempelvis fick terrassen klart sämre värden än förväntat, då geotekniska undersökningar på denna inte visat några brister. Även övriga mätvärden visade förvånansvärt låga bärigheter, långt under Trafikverkets krav och rekommendationer. Detta skulle till viss del kunna bero på kalibreringsfel hos mätutrustningen. Dock har alla mätningar gjorts med samma utrustning, vilket

betyder att alla punkter har samma eventuella kalibreringsfel. De relativa skillnaderna mellan mätpunkterna bör således inte vara påverkade av detta.

En bättre jämförelse med tydligare skillnader hade kunnat göras ifall betongkrossytan enbart bestod av betongkross och asfaltgranulatyten enbart bestod av asfaltgranulat. Detta var tyvärr inte möjligt i detta försök eftersom materialen inte fanns tillgängliga i alla kornstorlekar. Dessutom var förstärkningslagret i försöken tunnare än ett normalt förstärkningslager (320 mm istället för 420 mm), vilket bör ha gett sämre värden för bärigheten. Detta beror på att provvägarna endast är provisoriska och inte dimensionerade för att hålla under en längre tid.

7. Slutsatser

Sett till bärighet har både betongkross och asfaltgranulat likvärdiga, i flera fall även bättre egenskaper än traditionellt bergkross. Detta gäller vid utläggning, men materialen har även fördelen att de har en efterbindande effekt, som gör att bärigheten ökar med tiden. När det gäller stabilitet är skillnaderna större mellan materialen. Betongkross har precis som för bärighet liknande stabilitetsegenskaper som bergkross, även här lite bättre i många fall. Detta gäller dock bara upp till en belastning på 1,2 MPa, då betongkrosset löper stor risk att drabbas av nedkrossning, vilket försämrar stabiliteten igen. Asfaltgranulat har sämre stabilitet än både betong- och bergkross, vilket gör att materialet inte bör användas på ytor med stor andel tunga fordon eller mycket statiska påkänningar. Stabiliteten kan dock förbättras av inblandning av stenmaterial eller flygaska, samt att lagren får ligga öppna för trafik ett tag innan ovanliggande asfaltlager läggs på.

De två materialen gör sig bäst i olika nivåer av överbyggnaden. Betongkross används med fördel i förstärkningslagret, eftersom dess självbindande effekt förstärks av en tjockare lagertjocklek, medan asfaltgranulat kräver tunnare lager för att kunna packas ordentligt, och därför passar bättre i det tunnare bärlagret. Dock går båda materialen att använda i både bär- och förstärkningslager, men det finns då en del viktiga saker att tänka på. Exempelvis bör inte betongkross användas i bärlagret på vägar med mycket biltrafik, eftersom lasterna är högre i bärlagret än längre ner i konstruktionen, och de höga lasterna ökar risken för nedkrossning av betongen, med permanenta deformationer som följd. Det ökar dessutom risken för saltinträngning, något som också påverkar betongkrosset negativt. Asfaltgranulat kan användas i förstärkningslagret, men behöver då läggas ut i flera skikt om max 150 mm för att uppnå ett tillräckligt packningsarbete.

Klimat- och miljöbesparingarna som kan göras ligger främst i vinsten som görs i att nytt material inte behöver brytas. Upprättandet av nya bergtäkter har stor påverkan på klimat och miljö, något som tas bort vid användning av återvunna material. Med tanke på att bergtäkter placeras allt längre ifrån byggplatser kan besparingar också göras på transporter. Eftersom byggnader och vägar som rivs förmodligen ligger närmare den nya byggplatsen än vad bergtäkterna ligger, finns potential att återvinningen av material kan ske närmare och där skulle besparingar på transportutsläpp kunna ske. De återvunna materialen i sig har ingen större negativ påverkan på klimat och miljö, förutsatt att de rensas från föroreningar och skadliga ämnen som de kan ha fått under tidigare användning, något som främst gäller för betongkrosset.

Det finns andra återvunna material än betongkross och asfaltgranulat som kan användas i de obundna lagren, som exempelvis, masugnsslagg/hyttsten, flygaska, skumglas och andra typer av slagg. Dessa material har olika egenskaper som gör att de lämpar sig specifikt för olika användningsområden, men alla kan användas för att minska behovet av att bryta nytt bergkrossmaterial. Med tanke på den stora mängd bergkross som används årligen är det dock svårt att eliminera behovet helt, och till det är det en ganska lång bit kvar.

8. Förslag på framtida studier

Detta arbete har svarat på en del frågor om återvunna material, men även öppnat upp för att det finns mycket mer inom området att studera. Därför följer här några förslag på framtida studier som kan göras inom ämnet:

- Hur påverkas vägens bärighet och stabilitet av återvunna material i överbyggnadens bundna lager jämfört med referensfallet?
- Hur påverkas vägens bärighet och stabilitet med enbart betongkross och enbart asfaltgranulat i överbyggnadens obundna lager jämfört med referensfallet?
- Hur påverkas vägens bärighet och stabilitet med andra återvunna material i överbyggnadens obundna lager jämfört med referensfallet? Till exempel hyttsten, flygaska, skumglas och annat slag.
- Hur påverkas vägens bärighet och stabilitet av en blandning av betongkross och asfaltgranulat i överbyggnadens obundna lager jämfört med referensfallet?
- Hur går tester och reningsprocess av återvunna material till och hur kan dessa förenklas, effektiviseras och förbättras?
- Kan lagertjockleken minskas för betongkross och/eller asfaltgranulat med tanke på den efterbindande effekten som ökar bärighet och stabilitet? Hur mycket i så fall?
- Hur stor är nedkrossningen av betongkross när det används i bärlagret och hur påverkar det bärighet och stabilitet? Vilka trafiklaster klarar det av?
- Utföra en utförlig klimatkalkyl för att undersöka mer noggrant vilken klimatbesparing som görs vid användning av återvunna material. Även kartlägga hur stor transportbesparing som kan göras.
- Undersöka packningen på varje enskilt lager med hjälp av mätsensorer på de olika lagren (tidigare nämnt i avsnitt 6.1.2.).

9. Referenser

- Agardh, S. & Parhamifar, E., 2014. *Vägbyggnad*. 1:a red. Stockholm: Liber AB.
- Ahlberg, S., 2016. *Vägar*. 1:a red. Stockholm: Balkong Förlag.
- Alam, T., Abdelrahman, M. & Schram, S., 2010. *Laboratory characterisation of recycled asphalt pavement as a base layer*, u.o.: International Journal of Pavement Engineering, 11:2, pp. 123-131.
- Ardalan, N., Wilson, D. & Larkin, T., 2020. *Analyzing the Application of Different Sources of Recycled Concrete Aggregate for Road Construction*, u.o.: Transportation Research Record, SAGE.
- Arm, M., 2003. *Mechanical properties of residues as unbound road materials*. Stockholm: KTH.
- Bendz, D., Flyhammar, P. & Hartlén, J., 2000. *Restproduktanvändning vid anläggningsarbete och byggande för en hållbar infrastrukturutveckling*., Stockholm: Naturvårdsverket.
- Björkdahl, M. & Jansson, M., 2001. *Bärighet hos obundna material*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- Brännmark, D. & Norberg, D., 2019. *Miljöpåverkan vid grundläggning i samband med vägbyggnad*, Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan.
- Camargo, F., Wen, H., Edil, T. & Son, Y., 2013. *Comparative assessment of crushed aggregates and bound/unbound recycled asphalt pavement as base materials*., u.o.: International Journal of Pavement Engineering, 14:3, pp 223-230.
- Cameron, D., Azam, A., Rahman, H., Andrews, R., Michell, P. & Gabr, A., 2013. *The use of recycled aggregates in unbound road pavements*, u.o.: Research Gate.
- Ciampa, D., Cioffi, R., Colangelo, F., Diomedi, M., Farida, I. & Olita, S., 2020. *Use of Unbound Materials for Sustainable Road Infrastructures*, u.o.: MDPI.
- Eklöf, I., Brander, L., Hedenstedt, A., Hellman, F., Johansson, I., Johansson, M., Lövström, M., Macsik, J. & Schouenburg, B., 2016. *Askor för konstruktionsändamål*, Linköping: VTI.
- Ekman, L. & Jönsson, K., 2020. *Betongens klimatpåverkan*, Lund: LTH, Lunds Universitet.
- Enetjärn natur AB, 2015. *Handbok - Inspiration till att skapa bra natur i täkter*. [Online] Available at: https://swerock.se/siteassets/pdfer/handbok-for-biologisk-mangfald-i-takter_151015_lagupplöst.pdf [Använd 9 Mars 2021].
- Hasan, U., Whyte, A. & Al Jassmi, H., 2020. *Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix*

asphaltand blast furnace slag use against traditional approach, u.o.: Journal of Cleaner Production, Elsevier.

Jacobson, T., 2002a. *Återvinning av krossad asfalt som bär- och förstärkningslager. Del 1 – Karakterisering och egenskaper genom laboratoriestudier*, Linköping: VTI.

Jacobson, T., 2002b. *Återvinning av krossad asfalt som bär- och förstärkningslager. Del 2 – Erfarenheter från fältstudier*, Linköping: Väg- och transportforskningsinstitutet.

Jacobson, T., 2004. *På väg igen - Vägen tillbaka för återvunnen asfalt*. Stockholm-Hammarby: EO Print.

Jacobson, T., 2007. *Återvinning av tjärasfalt och krossad asfaltbeläggning vid motorvägsbygget på E4 via Markaryd*, Stockholm: VTI.

Jayakody, S., Gallage, C. & Ramanujam, J., 2019. *Performance characteristics of recycled concrete aggregate as an unbound pavement material*, u.o.: Heliyon Volume 5 issue 9, Elsevier.

Jepsson, S. & Nyberg, E., 2017. *Återvinning av asfalt och betong*, Lund: Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, Lunds Tekniska Högskola.

Jingfors, J. & Nilsson, A., 2018. *Användning av alternativa material i vägkonstruktioner*, Helsingborg: Lunds Universitet.

Johansson, B., 1998. *Krossad betong som överbyggnadsmaterial - fullskaleförsök*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.

Johansson, E., 2011. *Betongåtervinning*, Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.

Johansson, H., Ydrevik, K. & Arvidsson, H., 1996. *Krossad betong - ett material för användning i vägar och gator*, u.o.: VTI.

Kandiel, Z., 2017. *Dimensionering av överbyggnader i Nordiska länder*, Umeå: Umeå universitet.

Knutz, Å., 1999. *Användning av restprodukter i vägbyggnad*. 1999:161 red. Borlänge: Vägverket.

Kuttah, D., 2020. *Bärighetskontroll av obundna material med koppling till M-E beräkningar*, Linköping: VTI.

Lindgren, Å., 1998. *Road Construction Materials as a Source of Pollutants*. Luleå: Luleå University of Technology.

Miljöfabriken, u.å.. *Betongkross 0-90*. [Online]

Available at: <https://www.miljofabriken.com/produkt/betongkross-0-90/>

[Använd 25 Maj 2021].

Miljösamverkan Sverige, Länsstyrelserna & Naturvårdsverket, 2006. *Efterbehandling av täkter*. [Online]

Available at:

<https://www.lansstyrelsen.se/download/18.6ae610001636c9c68e542788/1530198803858/E>

[fterbehandling%20av%20t%C3%A4kter%202006.pdf](#)

[Använd 9 Mars 2021].

Miljösamverkan Västra Götaland, 2011. *Handledning för täktillsyn*. [Online]

Available at:

<http://www.miljosamverkanvg.se/SiteCollectionDocuments/Projekt%20och%20rapporter/Milj%c3%b6farlig%20verksamhet/T%c3%a4ktillsyn/takttillsynshandledning-2011-bildfix.pdf>

[Använd 9 Mars 2021].

Molenaar, A. & van Niekerk, A., 2002. *Effects of Gradation, Composition, and Degree of Compaction on the Mechanical Characteristics of Recycled Unbound Materials*, u.o.: Transportation Research Record vol. 1787, 1: pp. 73-82.

Molin, C., 2005. *Återvunnen betongs kvalitet och möjligheter.*, Stockholm: SBUF.

Naturskyddsföreningen, u.å.. *Cirkulär ekonomi – istället för slängsamhället*. [Online]

Available at: <https://www.naturskyddsforeningen.se/cirkular-ekonomi>

[Använd 9 Mars 2021].

Naturvårdsverket, 2010. *Återvinning av avfall i anläggningsarbeten*, Stockholm: Naturvårdsverket.

Naturvårdsverket, 2020a. *Grundvatten av god kvalitet*. [Online]

Available at: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Sveriges-miljomal/Miljokvalitetsmalen/Grundvatten-av-god-kvalitet/>

[Använd 28 Januari 2021].

Naturvårdsverket, 2020b. *Vägledning om avfall*. [Online]

Available at: <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Avfall/>

[Använd 9 Mars 2021].

Naturvårdsverket, 2021. *Etappmålen*. [Online]

Available at: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Sveriges-miljomal/Etappmal/>

[Använd 23 Februari 2021].

Nilsson, J., 2021. *VD ÅGAB* [Intervju] (8 Februari 2021).

Poon, C., Qiao, Q. & Chan, D., 2006. *The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base*, u.o.: Waste Management Volume 26 Issue 10, Elsevier.

SBUF, u.å.. *Provning av kulkvarnsvärde på 5,6 – 8 mm stenfraktion*. [Online]

Available at:

<https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/InfoSheets/PublishedInfoSheet/15bce8b7-612d-4a44-b9f3-8a35a6016cae/Info%2002-29.pdf>

[Använd 5 Maj 2021].

SGI, 2006. *Handbok - Flygaska i mark- och vägbyggnad. Grusvägar*. [Online]

Available at: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i18-4.pdf>

[Använd 3 juni 2021].

- SIG, 2007. *Handbok - Skumglas i mark- och vägbyggnad*. [Online]
Available at: <https://www.hasopor.se/wp-content/uploads/2016/10/handbok-skumglas-i-mark-och-vagbyggnad.pdf>
[Använd 17 Maj 2021].
- SGU, 2020. *Grus, sand och krossberg 2019*, Uppsala: SGU - Sveriges Geologiska Undersökning.
- Silfverberg, E., 2021. *Miljöchef ÅGAB* [Intervju] (8 Februari 2021).
- Skanska, 2018. *Gröna vägar med cirkulär asfalt*. [Online]
Available at: https://www.skanska.se/om-skanska/press/nyheter/cirkular-asfalt/?gclid=Cj0KCCQiA3smABhCjARIsAKtrg6IafRu-v3XyZzXqxRYSoyVJg5j-AbrobOaRQc5Q_BAANEBooH04ymkaAsumEALw_wcB
[Använd 28 Januari 2021].
- Skanska, u.å. *REform bärlager*. [Online]
[Använd 4 Mars 2021].
- Svensk betong, u.å.. *Val av betongkvalitet och exponeringsklass*. [Online]
Available at: <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-platsgjutet/statik/parkeringshus/bjalklag/val-av-betongkvalitet-och-exponeringsklass?fbclid=IwAR3tUs2DLNuO513v640E9-AiKHIODlvgv-yajqjE9VGcbpmlHkth4GXUvA>
[Använd 24 Mars 2021].
- Sveriges riksdag, u.å.. *Plan- och bygglag (2010:900)*. [Online]
Available at: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/plan--och-bygglag-2010900_sfs-2010-900
[Använd 18 Maj 2021].
- Thøgersen, F., Gregoire, C., Stryk, J., Hornyk, P., Descantes, Y., Chazallon, C., Blasl, A., Broere, P., Bizjak, K., Hellman, F. & Arm, M., 2013. *Recycling of road materials into new unbound road layers – main practice in selected European countries*, u.o.: Road Materials and Pavement Design.
- Trafikverket, 2002. *STENMATERIAL Bestämning av kulkvarnsvärde*. [Online]
Available at:
https://www.trafikverket.se/contentassets/5757e1e5ee8048ed8611d9c84c47829e/17_fas25_9-02.pdf
[Använd 5 Maj 2021].
- Trafikverket, 2004. *Allmän teknisk beskrivning - Betong i vägkonstruktioner*. [Online]
Available at: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10592/RelatedFiles/2004_11_atb_krossad_betong_i_vagkonstruktioner.pdf
[Använd 16 Mars 2021].
- Trafikverket, 2005. *ABT Väg Kapitel E Obundna material*, u.o.: Trafikverket.
- Trafikverket, 2011a. *TRVK Väg*, Stockholm: Trafikverket.

- Trafikverket, 2011b. *TRVKB Obundna lager*, Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket, 2011c. *TRVR Väg*. [Online]
Available at: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10751/RelatedFiles/2011_073_TRVR_vag_3.pdf
[Använd 16 Mars 2021].
- Trafikverket, 2012. *Förstärkningsåtgärder*, Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket, 2013a. *TRVK Alternativa material.*, Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket, 2013b. *TRVKB Alternativa material*. [Online]
Available at: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10763/RelatedFiles/2011_062_TRVKB_10_Alternativa_material.pdf
[Använd 16 Mars 2021].
- Trafikverket, 2013c. *TRVR Alternativa material*, Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket, 2014a. *Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning*. [Online]
[Använd 2 Mars 2021].
- Trafikverket, 2014b. *Miljöuppföljningar av återvunnen tjärasfalt 2001-2011*, Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket, 2020. *Sveriges vägnät*. [Online]
Available at: <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/vag/Sveriges-vagnat/>
[Använd 28 Januari 2021].
- Trafikverket, 2021. *KRAV TRVINFRA-00224 Version 2.0*, u.o.: Trafikverket.
- Tyllgren, P., 2007. *Teknisk beskrivning SAMMANSATTA OBUNDNA MATERIAL för väg- och anläggningsbyggande.*, Malmö: Skanska.
- Ullah, S. & Tanyu, B., 2019. *Methodology to develop design guidelines to construct unbound basecourse with reclaimed asphalt pavement (RAP)*, u.o.: Dept. of Civil, Environmental, and Infrastructure Engineering, George Mason University (GMU), Elsevier.
- Ungureanu, D., Taranu, N., Hoha, D., Zghibarcea, S., Isopescu, D., Boboc, V., Oprisan, G., Scutaru, M., Boboc, A. & Hudisteanu, I., 2020. *Accelerated testing of a recycled road structure made with reclaimed asphalt pavement material*, u.o.: Construction and Building Materials, Elsevier.
- VTI, 2020. *Lätt fallvikt - vägmaterial*. [Online]
Available at: <https://www.vti.se/tjanster/vag--och-geoteknik/latt-fallvikt---vagmaterial>
[Använd 10 Mars 2021].
- Vägverket, 2004. *Handbok för återvinning av asfalt*, Borlänge: Vägverket.
- Vägverket, 2005. *Luftkyld masugnsslagg - hyttsten - i vägkonstruktioner*. [Online]
Available at: <https://trafikverket.ineko.se/Files/sv->

SE/10593/RelatedFiles/2005_39_luftkyld_masugnsslagg_hyttsten_i_vagkonstruktioner.pdf
[Använd 25 Maj 2021].

Vägverket, 2007. *Alternativa material i väg- och järnvägsbyggnad.*, Borlänge: Vägverket.

Västra Götalandsregionen Miljömedicinskt centrum, 2017. *Miljömedicinsk bedömning av ferrokromslagg på några allmänna platser i Trollhättan.* [Online]

Available at: <http://www.amm.se/wp-content/uploads/2017/09/Miljomedicinsk-bedomning-av-ferrokromslagg-pa-nagra-allmanna-platser-i-Trollhattan-170705.pdf>
[Använd 25 Maj 2021].

Westling, M., 1999. *Betongvägars funktionella egenskaper : en state-of-the-art rapport.* Stockholm: Cement och betong institutet.

Wiman, L. & Tholén, O., u.å.. *3 Vägens uppbyggnad.* [Online]

Available at: <https://asfaltboken.se/vagens-uppbyggnad/>
[Använd 18 Mars 2021].

Ydrevik, K. & Arm. M., 2001. Krossad betong i vägar. *Dansk Vejtidskrift*, 5:2001, pp. 22-24.

Ydrevik, K., 1999. *Återvägen*, Linköping: VTI.

Ydrevik, K., 2000. *Hållfasthetstillväxt hos ballast av krossad betong.*, u.o.: VTI.

ÅGAB Syd, u.å.. *Våra anläggningar.* [Online]

Available at: <https://www.agabsyd.se/om-oss/vara-anlaggningar/>
[Använd 24 Februari 2021].

Bilaga 1. Intervjufrågor ÅGAB Syd AB

Platsbesök 8/2-2021

- Vad för betong får ni in?
- Hur mycket betong och asfalt får ni in?
- Bearbetar ni betongen och asfalten, och i sådana fall hur och varför?
- Hur lagras betongen och asfalten?
- Vad brukar den återvunna betongen och asfalten användas till?
- Hur ser provtagningsprocessen ut för att säkra mot föroreningar och liknande?
- Hur provas och uppskattas radonhalten i betongen?

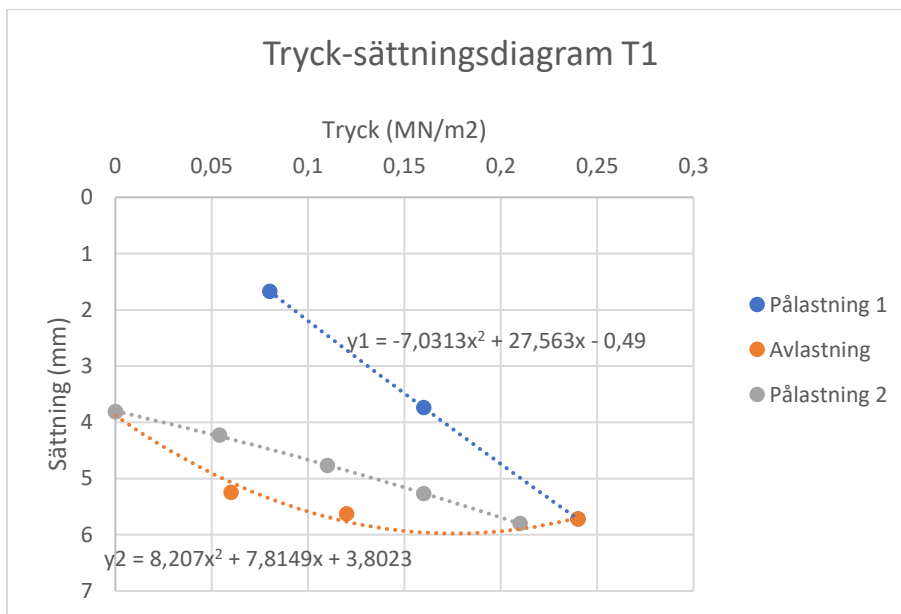
Bilaga 2. Mätresultat plattbelastning

Punkt 1 – Terrass Betongkross

Datum och tid: 23/4–2021, 09.00. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 22. Mätvärden punkt 1, terrass.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	1,67
0,16	3,74
0,24	5,72
0,12	5,63
0,06	5,25
0	3,81
0,054	4,23
0,11	4,77
0,16	5,27
0,21	5,8



Figur 51. Tryck-sättningsdiagram punkt 1, terrass.

Tabell 23. Beräkning av Ev1, Ev2 och bärighetskvot.

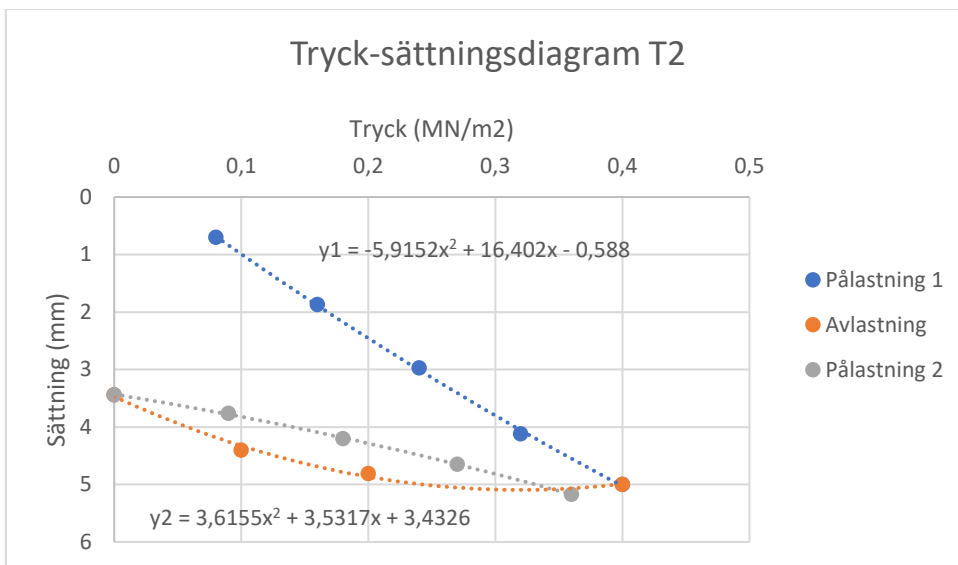
Ev1:			Ev2	
a0	0,49		a0	3,8023
a1	27,563		a1	7,8149
a2	-7,0313		a2	8,207
Ev1	8,695488178		Ev2	22,99537
Ev2/Ev1	2,644516985			

Punkt 2 – Terrass Betongkross

Datum och tid: 23/4–2021, 10.15. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 24. Mätvärden punkt 2, terrass.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,7
0,16	1,87
0,24	2,97
0,32	4,12
0,4	5
0,2	4,81
0,1	4,4
0	3,44
0,09	3,76
0,18	4,2
0,27	4,65
0,36	5,17



Figur 52. Tryck-sättningsdiagram punkt 2, terrass.

Tabell 25. Beräkning av Ev_1 , Ev_2 och bärighetskvot.

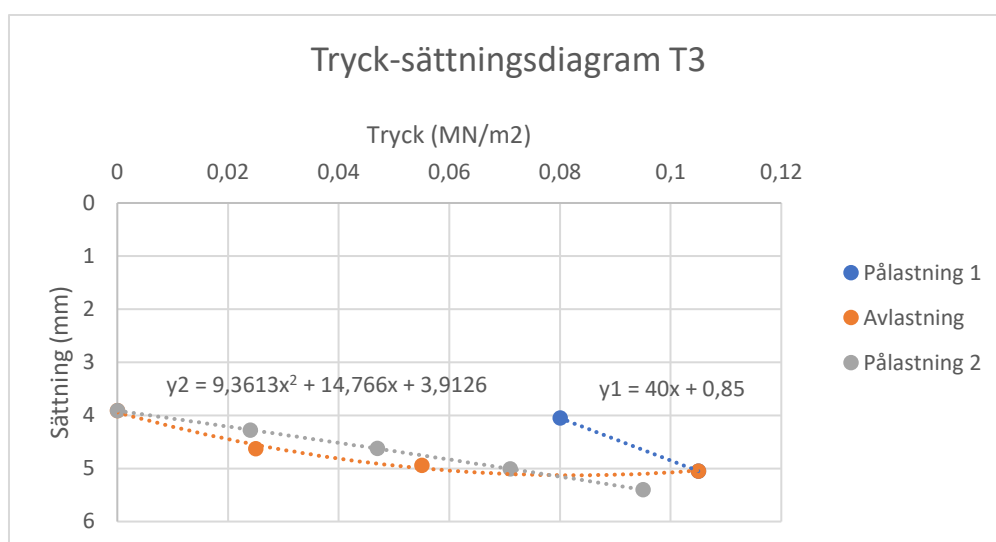
a0	-0,588	a0	3,4326
a1	16,402	a1	3,5317
a2	-5,9152	a2	3,6155
Ev_1	16,0302994	Ev_2	45,19978
Ev_2/Ev_1	2,819646839		

Punkt 3 – Terrass Asfaltgranulat

Datum och tid: 23/4–2021, 11.20. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 26. Mätvärden punkt 3, terrass.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	4,05
0,105	5,05
0,055	4,94
0,025	4,63
0	3,91
0,024	4,28
0,047	4,62
0,071	5,01
0,095	5,4



Figur 53. Tryck-sättningsdiagram punkt 3, terrass.

Tabell 27. Beräkning av Ev1, Ev2 och bärighetskvot.

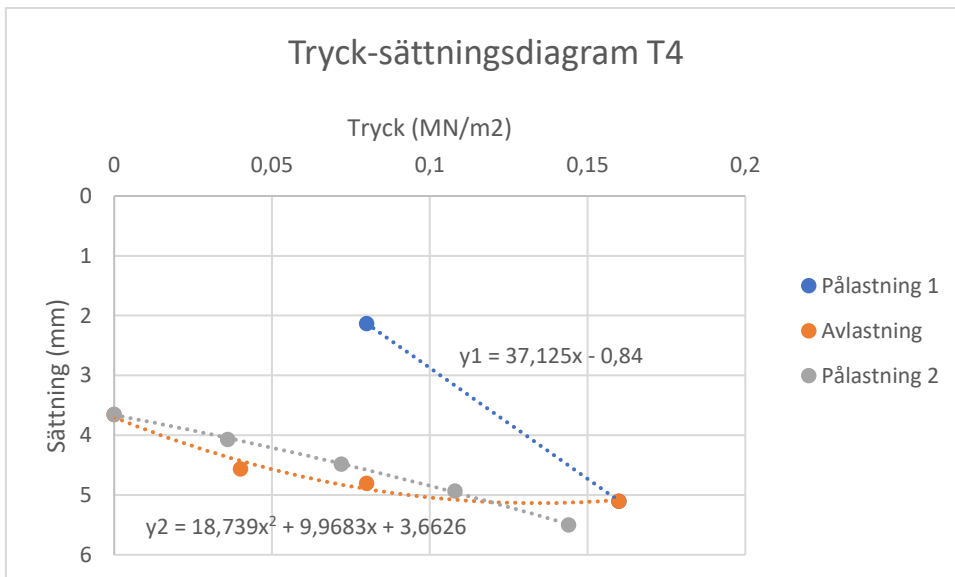
a0	0,85	a0	3,9126
a1	40	a1	14,766
a2	0	a2	9,3613
Ev1	5,625	Ev2	14,28668
Ev2/Ev1	2,53985404		

Punkt 4 – Terrass Asfaltgranulat

Datum och tid: 23/4–2021, 12.15. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 28. Mätvärden punkt 4, terrass.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	2,13
0,16	5,1
0,08	4,8
0,04	4,56
0	3,65
0,036	4,07
0,072	4,48
0,108	4,93
0,144	5,5



Figur 54. Tryck-sättningsdiagram punkt 4, terrass.

Tabell 29. Beräkning av Ev1, Ev2 och bärighetskvot.

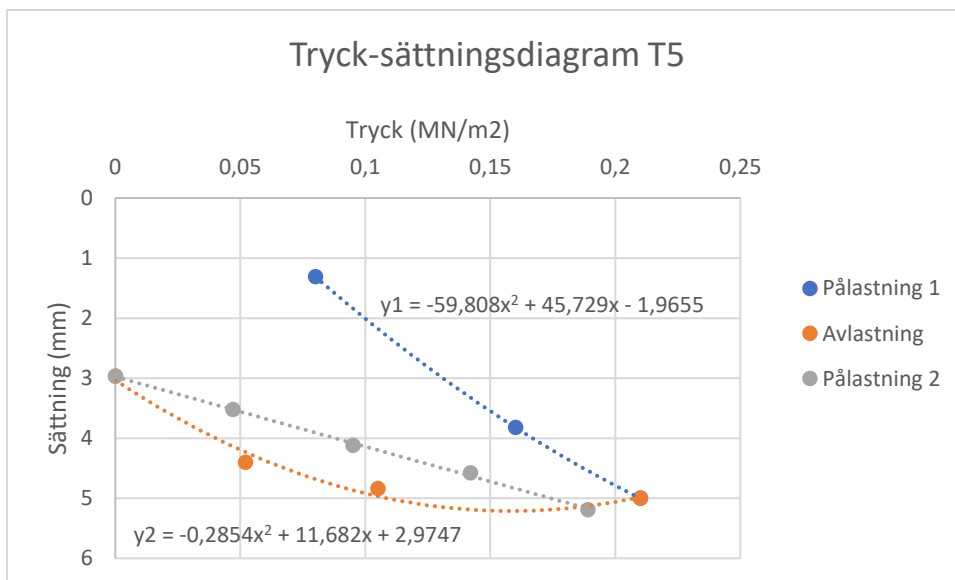
a0	-0,84	a0	3,6626
a1	37,125	a1	9,9683
a2	0	a2	18,739
Ev1	6,060606061	Ev2	17,35235
Ev2/Ev1	2,863138509		

Punkt 5 – Terrass Bergkross

Datum och tid: 23/4–2021, 14.25. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 30. Mätvärden punkt 5, terrass.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	1,31
0,16	3,82
0,21	5
0,105	4,84
0,052	4,4
0	2,97
0,047	3,52
0,095	4,12
0,142	4,58
0,189	5,19



Figur 55. Tryck-sättningsdiagram punkt 5, terrass.

Tabell 31. Beräkning av Ev1, Ev2 och bärighetskvot.

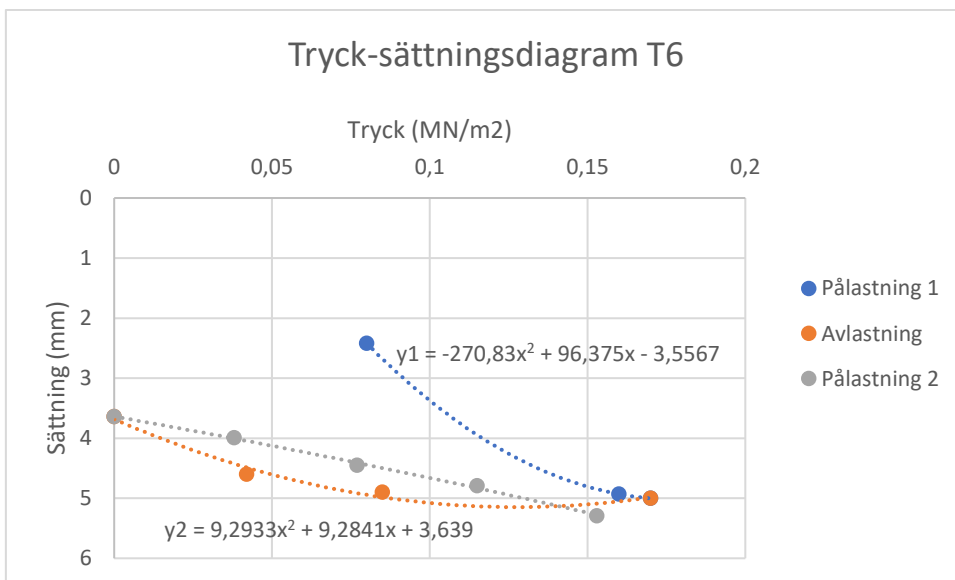
a0	1,9655	a0	2,9747
a1	45,729	a1	11,682
a2	-59,808	a2	-0,2854
Ev1	6,783376928	Ev2	19,35972
Ev2/Ev1	2,85399515		

Punkt 6 – Terrass Bergkross

Datum och tid: 23/4–2021, 13.40. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 32. Mätvärden punkt 6, terrass.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	2,42
0,16	4,93
0,17	5
0,085	4,9
0,042	4,6
0	3,64
0,038	3,99
0,077	4,45
0,115	4,79
0,153	5,29



Figur 56. Tryck-sättningsdiagram punkt 6, terrass.

Tabell 33. Beräkning av Ev_1 , Ev_2 och bärighetskvot.

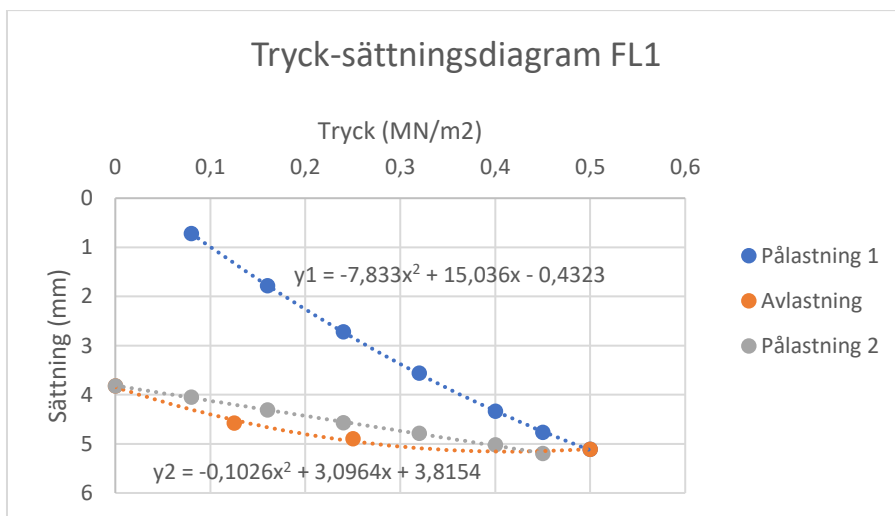
a0	-3,5567	a0	3,639
a1	96,375	a1	9,2841
a2	-270,83	a2	9,2933
Ev_1	4,470148349	Ev_2	20,71068
Ev_2/Ev_1	4,633107575		

Punkt 1 – Förstärkningslager betongkross

Datum och tid: 27/4–2021, 08.30. Väder: Soligt, ca 5°C

Tabell 34. Mätvärden punkt 1, förstärkningslager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,72
0,16	1,78
0,24	2,72
0,32	3,56
0,4	4,34
0,45	4,77
0,5	5,11
0,25	4,9
0,125	4,58
0	3,82
0,08	4,05
0,16	4,31
0,24	4,57
0,32	4,79
0,4	5,02
0,45	5,2



Figur 57. Tryck-sättningsdiagram punkt 1, förstärkningslager.

Tabell 35. Beräkning av Ev_1 , Ev_2 och bärighetskvot.

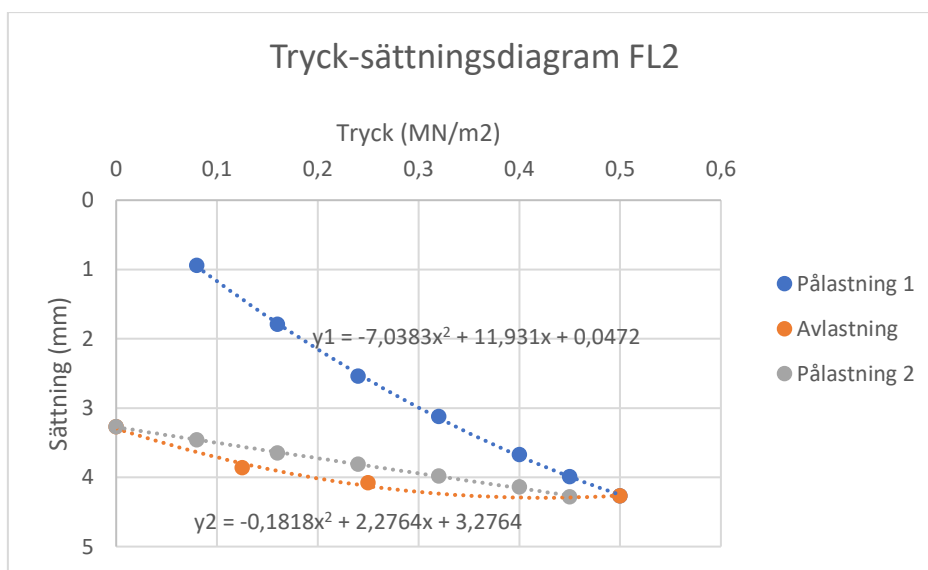
a0	-0,4323	a0	3,1854
a1	15,036	a1	3,0964
a2	-7,833	a2	-0,1026
Ev1	20,23472278	Ev2	73,8892
Ev2/Ev1	3,651604217		

Punkt 2 – Förstärkningslager betongkross

Datum och tid: 27/4–2021, 10.00. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 36. Mätvärden punkt 2, förstärkningslager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,94
0,16	1,79
0,24	2,54
0,32	3,12
0,4	3,67
0,45	3,99
0,5	4,27
0,25	4,08
0,125	3,86
0	3,27
0,08	3,46
0,16	3,65
0,24	3,81
0,32	3,98
0,4	4,14
0,45	4,28



Figur 58. Tryck-sättningsdiagram punkt 2, förstärkningslager.

Tabell 37. Beräkning av E_{v1} , E_{v2} och bärighetskvot.

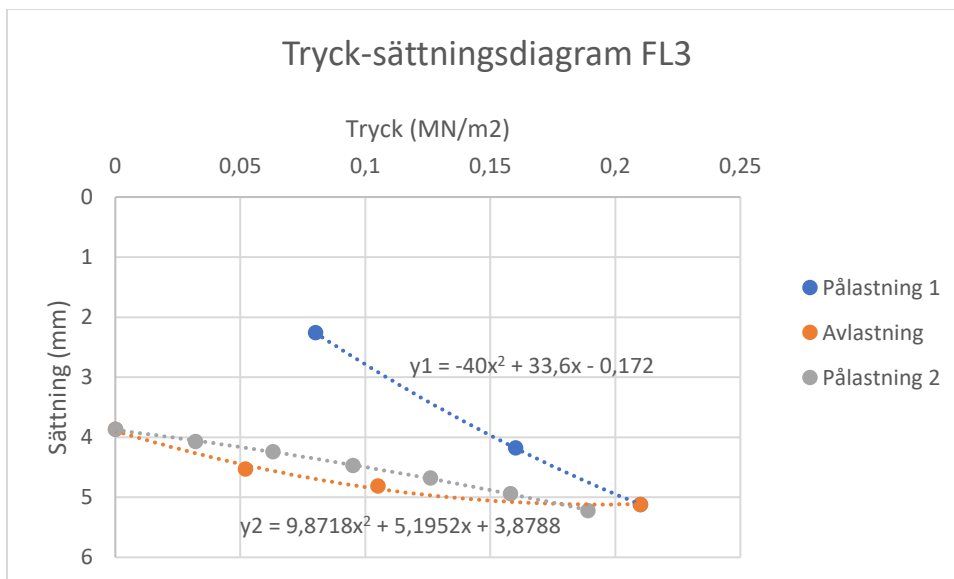
a0	0,0472	a0	3,2764
a1	11,931	a1	2,2764
a2	-7,0383	a2	-0,1818
E_{v1}	26,74798053	E_{v2}	102,9513
E_{v2}/E_{v1}	3,84893617		

Punkt 3 – Förstärkningslager asfaltgranulat

Datum och tid: 27/4–2021, 11.00. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 38. Mätvärden punkt 3, förstärkningslager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	2,26
0,16	4,18
0,21	5,12
0,105	4,81
0,052	4,53
0	3,87
0,032	4,07
0,063	4,24
0,095	4,47
0,126	4,68
0,158	4,94
0,189	5,22



Figur 59. Tryck-sättningsdiagram punkt 3, förstärkningslager.

Tabell 39. Beräkning av Ev1, Ev2 och bärighetskvot.

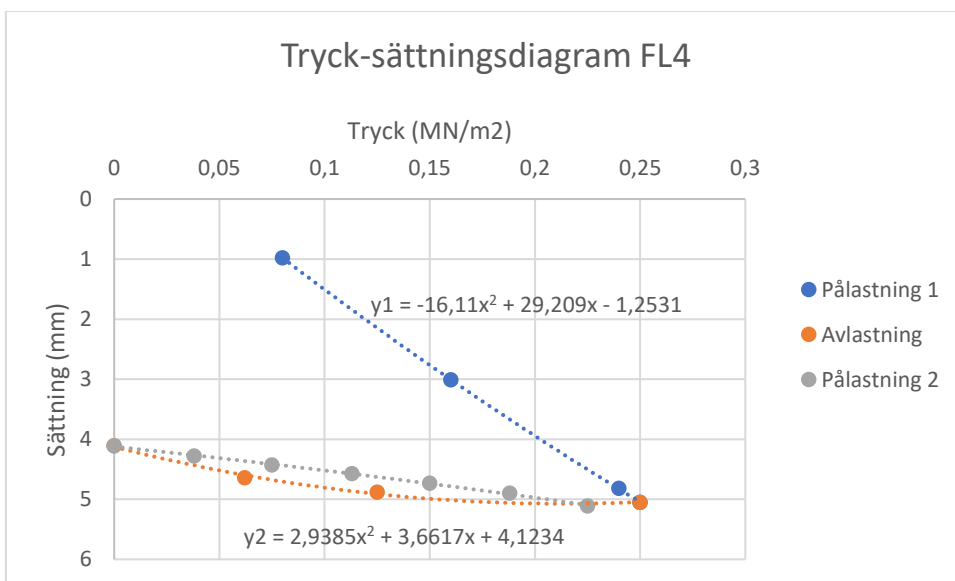
a0	-0,172	a0	3,8788
a1	33,6	a1	5,1952
a2	-40	a2	9,8718
Ev1	8,928571429	Ev2	30,95644
Ev2/Ev1	3,467121098		

Punkt 4 – Förstärkningslager asfaltgranulat

Datum och tid: 27/4–2021, 12.00. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 40. Mätvärden punkt 4, förstärkningslager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,98
0,16	3,01
0,24	4,82
0,25	5,05
0,125	4,88
0,062	4,64
0	4,11
0,038	4,28
0,075	4,43
0,113	4,57
0,15	4,73
0,188	4,9
0,225	5,11



Figur 60. Tryck-sättningsdiagram punkt 4, förstärkningslager.

Tabell 41. Beräkning av E_{v1} , E_{v2} och bärighetskvot.

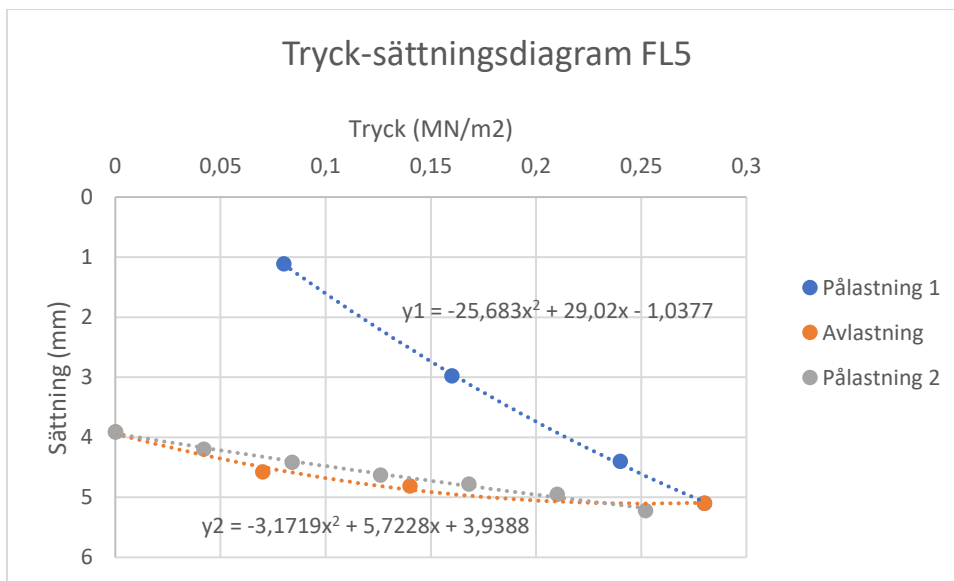
A0	-1,2531		a0	4,1234
a1	29,209		a1	3,6617
a2	-16,11		a2	2,9385
E_{v1}	8,935130949		E_{v2}	51,17911
E_{v2}/E_{v1}	5,72785224			

Punkt 5 – Förstärkningslager bergkross

Datum och tid: 27/4–2021, 13.15. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 42. Mätvärden punkt 5, förstärkningslager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	1,11
0,16	2,98
0,24	4,4
0,28	5,1
0,14	4,81
0,07	4,58
0	3,91
0,042	4,2
0,084	4,42
0,126	4,63
0,168	4,78
0,21	4,95
0,252	5,22



Figur 61. Tryck-sättningsdiagram punkt 5, förstärkningslager.

Tabell 43. Beräkning av E_{v1} , E_{v2} och bärighetskvot.

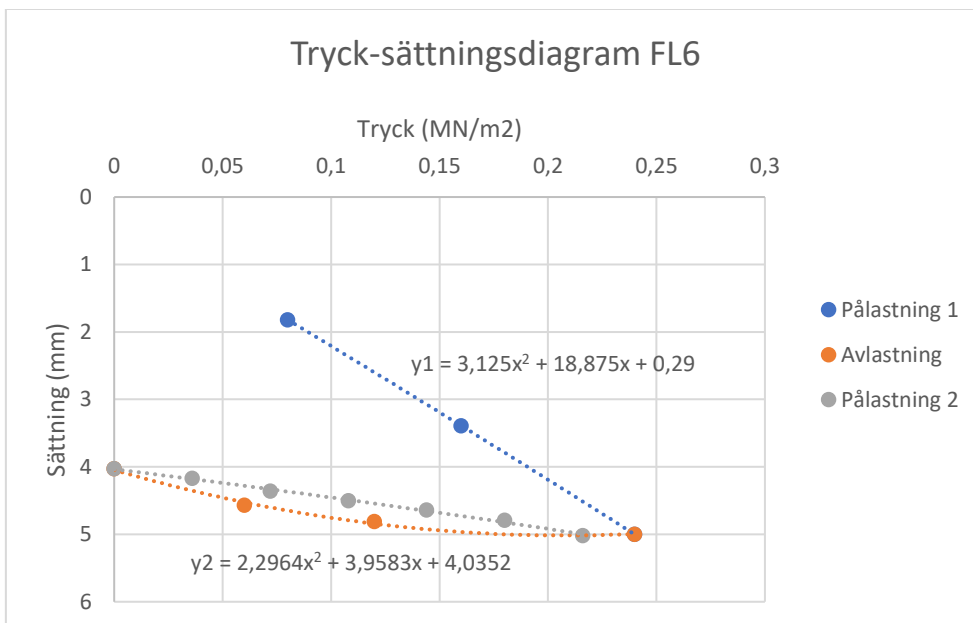
a0	-1,0377	a0	3,9388
a1	29,02	a1	5,7228
a2	-25,683	a2	-3,1719
E_{v1}	10,30750258	E_{v2}	46,53887
E_{v2}/E_{v1}	4,515048396		

Punkt 6 – Förstärkningslager bergkross

Datum och tid: 27/4–2021, 14.00. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 44. Mätvärden punkt 6, förstärkningslager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	1,82
0,16	3,39
0,24	5
0,12	4,81
0,06	4,57
0	4,03
0,036	4,17
0,072	4,36
0,108	4,5
0,144	4,64
0,18	4,79
0,216	5,02



Figur 62. Tryck-sättningsdiagram punkt 6, förstärkningslager.

Tabell 45. Beräkning av E_{v1} , E_{v2} och bärighetskvot.

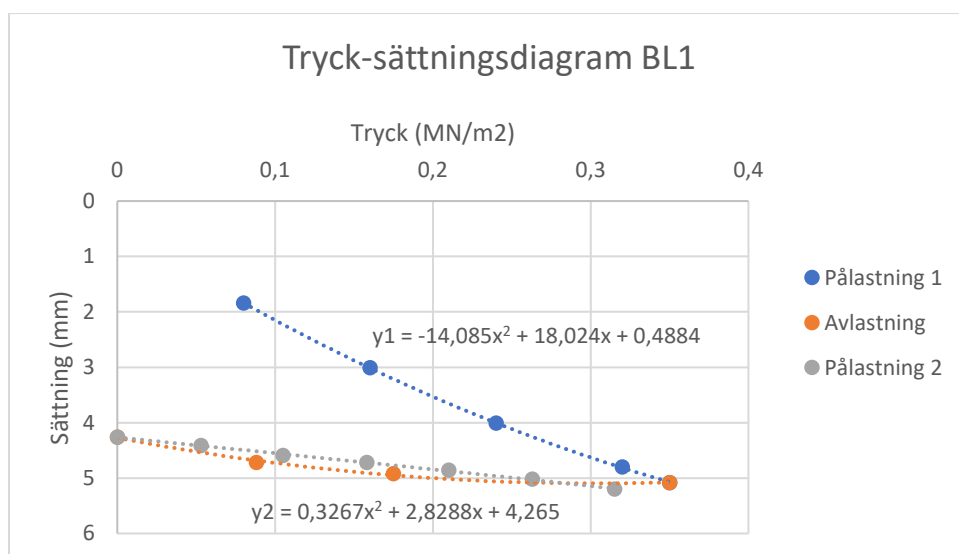
a0	0,29	a0	4,0352
a1	18,875	a1	3,9583
a2	3,125	a2	2,2964
E_{v1}	11,46496815	E_{v2}	49,89537
E_{v2}/E_{v1}	4,351985481		

Punkt 1 – Bärlager betongkross (mätning 1)

Datum och tid: 28/4–2021, 07.50. Väder: Soligt, ca 5°C

Tabell 46. Mätvärden punkt 1, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	1,84
0,16	3,01
0,24	4,01
0,32	4,8
0,35	5,08
0,175	4,92
0,088	4,72
0	4,26
0,053	4,41
0,105	4,59
0,158	4,72
0,21	4,86
0,263	5,02
0,315	5,2



Figur 63. Tryck-sättningsdiagram punkt 1, bärlager.

Tabell 47. Beräkning av Ev1, Ev2 och bärighetskvot.

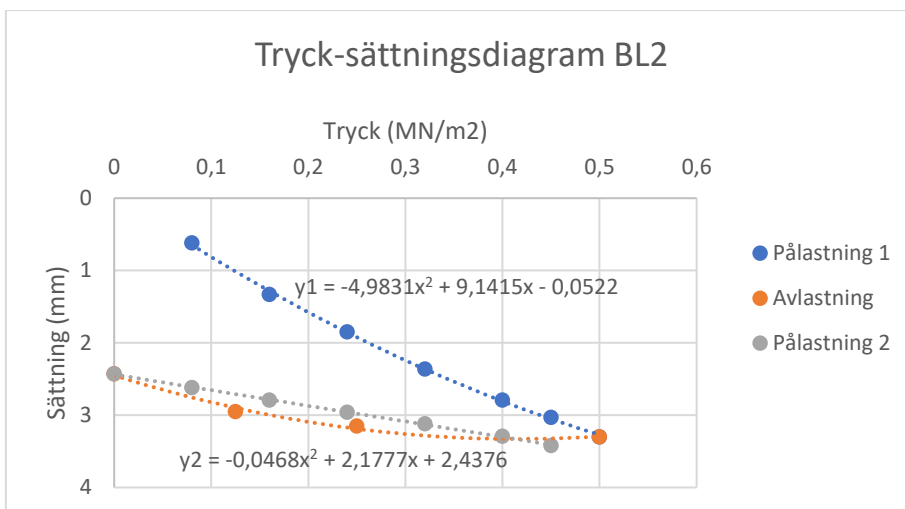
a0	0,4884	a0	4,265
a1	18,024	a1	2,8288
a2	-14,085	a2	0,3267
Ev1	17,18311473	Ev2	76,44883
Ev2/Ev1	4,449067239		

Punkt 2 – Bärlager betongkross (mätning 1)

Datum och tid: 28/4–2021, 08.30. Väder: Soligt, ca 5°C

Tabell 48. Mätvärden punkt 2, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,62
0,16	1,33
0,24	1,85
0,32	2,36
0,4	2,79
0,45	3,03
0,5	3,3
0,25	3,15
0,125	2,95
0	2,43
0,08	2,62
0,16	2,79
0,24	2,96
0,32	3,12
0,4	3,29
0,45	3,42



Figur 64. Tryck-sättningsdiagram punkt 2, bärlager.

Tabell 49. Beräkning av E_{v1} , E_{v2} och bärighetskvot.

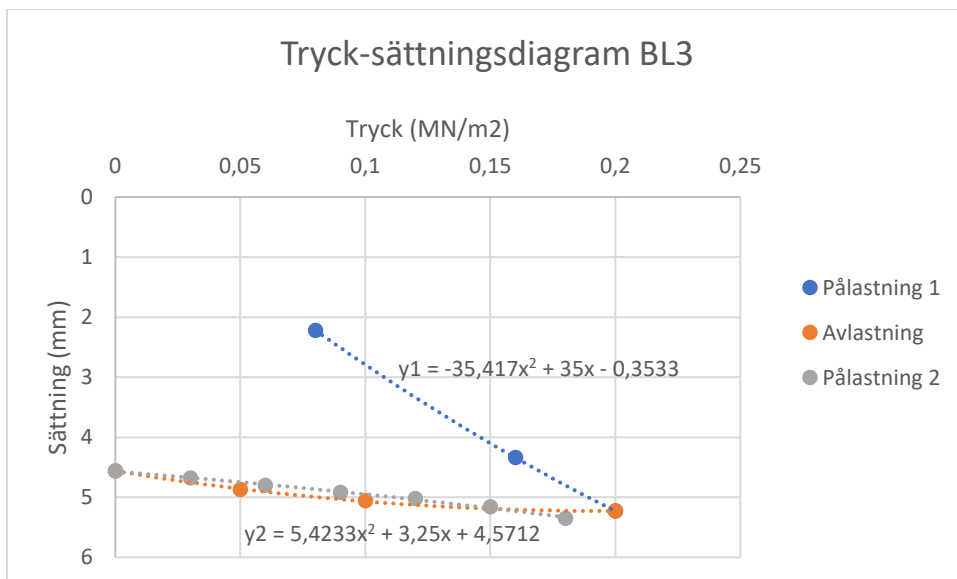
a0	-0,0522		a0	2,4376
a1	9,1415		a1	2,1777
a2	-4,9831		a2	-0,0468
E_{v1}	33,83484086		E_{v2}	104,4423
E_{v2}/E_{v1}	3,086826347			

Punkt 3 – Bärlager asfaltgranulat (mätning 1)

Datum och tid: 28/4–2021, 09.50. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 50. Mätvärden punkt 3, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	2,22
0,16	4,34
0,2	5,23
0,1	5,06
0,05	4,87
0	4,56
0,03	4,68
0,06	4,8
0,09	4,92
0,12	5,02
0,15	5,16
0,18	5,35



Figur 65. Tryck-sättningsdiagram punkt 3, bärlager.

Tabell 51. Beräkning av Ev1, Ev2 och bärighetskvot.

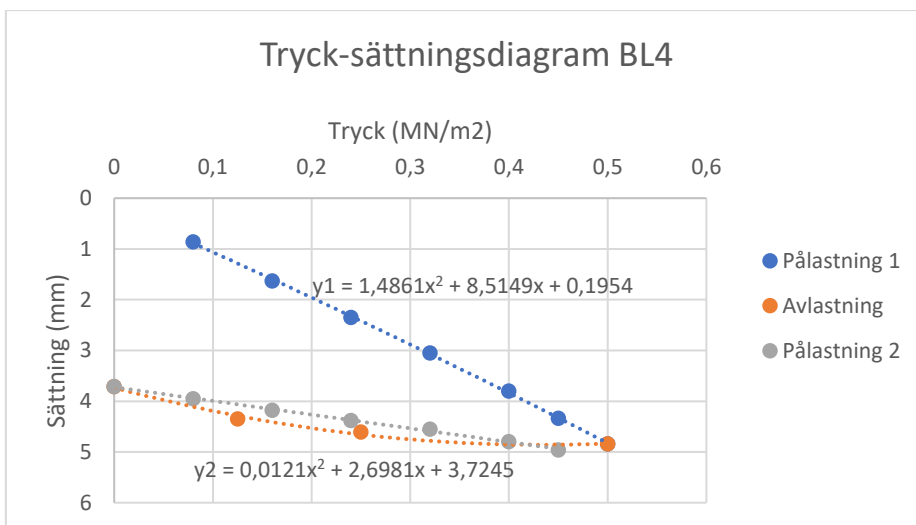
a0	-0,3533	a0	4,5712
a1	35	a1	3,25
a2	-35,417	a2	5,4233
Ev1	8,05972074	Ev2	51,90719
Ev2/Ev1	6,440320579		

Punkt 4 – Bärlager asfaltgranulat (mätning 1)

Datum och tid: 28/4–2021, 10.30. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 52. Mätvärden punkt 4, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,86
0,16	1,63
0,24	2,35
0,32	3,05
0,4	3,8
0,45	4,34
0,5	4,84
0,25	4,61
0,125	4,35
0	3,71
0,08	3,95
0,16	4,18
0,24	4,38
0,32	4,55
0,4	4,8
0,45	4,96



Figur 66. Tryck-sättningsdiagram punkt 4, bärlager.

Tabell 53. Beräkning av E_{v1} , E_{v2} och bärighetskvot.

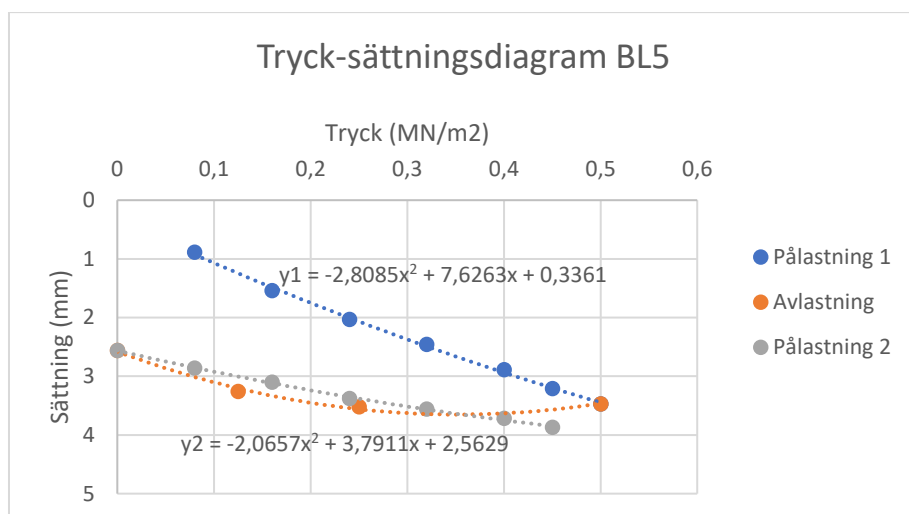
a0	0,1954	a0	3,7245
a1	8,5149	a1	2,6981
a2	1,4861	a2	0,0121
Ev1	24,30343651	Ev2	83,20544
Ev2/Ev1	3,423608158		

Punkt 5 – Bärlager bergkross

Datum och tid: 28/4–2021, 13.20. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 54. Mätvärden punkt 5, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,89
0,16	1,54
0,24	2,03
0,32	2,46
0,4	2,89
0,45	3,21
0,5	3,47
0,25	3,52
0,125	3,26
0	2,56
0,08	2,86
0,16	3,1
0,24	3,38
0,32	3,56
0,4	3,72
0,45	3,87



Figur 67. Tryck-sättningsdiagram punkt 5, bärlager.

Tabell 55. Beräkning av Ev_1 , Ev_2 och bärighetskvot.

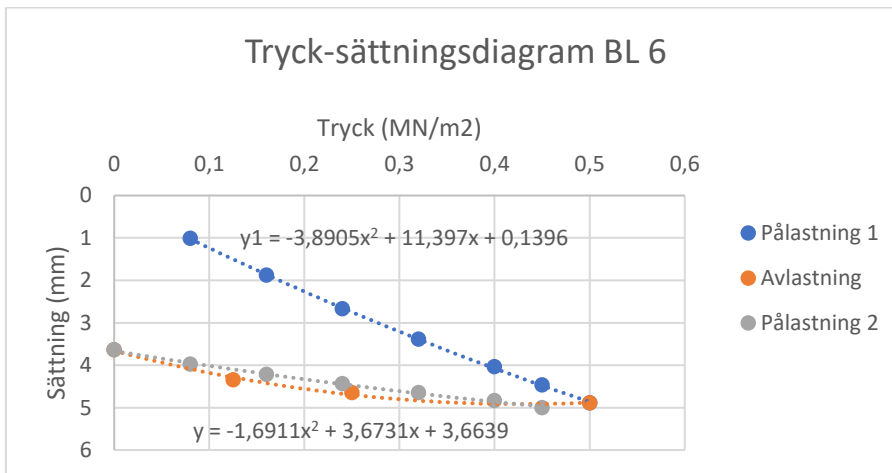
a0	0,3361		a0	2,5629
a1	7,6263		a1	3,7911
a2	-2,8085		a2	-2,9657
Ev_1	36,16171519		Ev_2	97,47644
Ev_2/Ev_1	2,695570237			

Punkt 6 – Bärlager bergkross

Datum och tid: 28/4–2021, 12.00. Väder: Soligt, ca 10°C

Tabell 56. Mätvärden punkt 6, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	1,01
0,16	1,88
0,24	2,67
0,32	3,39
0,4	4,04
0,45	4,47
0,5	4,89
0,25	4,65
0,125	4,35
0	3,64
0,08	3,98
0,16	4,22
0,24	4,44
0,32	4,65
0,4	4,84
0,45	5



Figur 68. Tryck-sättningsdiagram punkt 6, bärlager.

Tabell 57. Beräkning av Ev1, Ev2 och bärighetskvot.

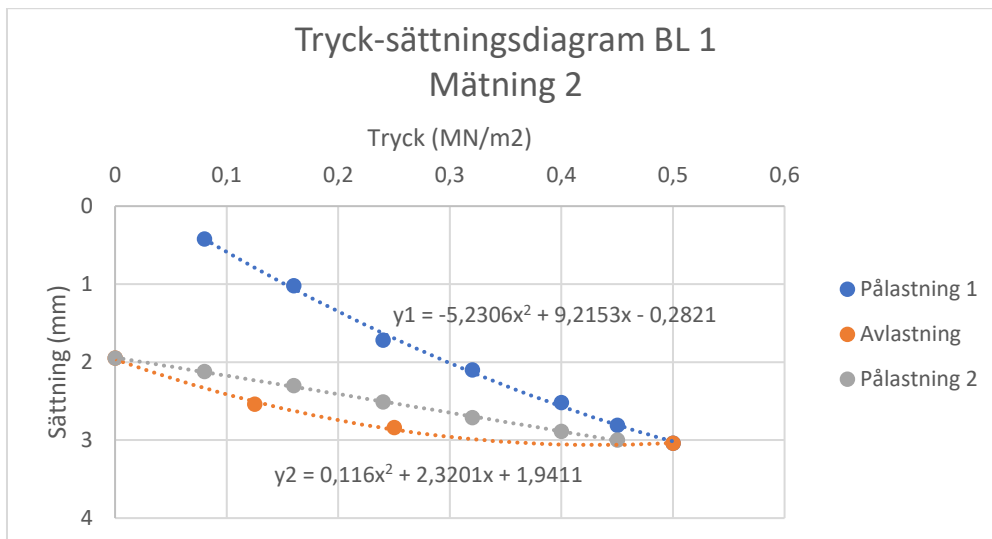
Ev1:		Ev2:	
a0	0,1396	a0	3,6639
a1	11,397	a1	3,6731
a2	-3,8905	a2	-1,6911
Ev1	23,80511545	Ev2	79,57419
Ev2/Ev1	3,342734876		

Punkt 1 – Bärlager betongkross (mätning 2)

Datum och tid: 21/5–2021, 09.00. Väder: Molnigt, ca 10°C

Tabell 58. Mätvärden punkt 1, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,42
0,16	1,02
0,24	1,72
0,32	2,1
0,4	2,52
0,45	2,81
0,5	3,04
0,25	2,84
0,125	2,54
0	1,95
0,08	2,12
0,16	2,3
0,24	2,51
0,32	2,71
0,4	2,89
0,45	3



Figur 69. Tryck-sättningsdiagram punkt 1, bärlager.

Tabell 59. Beräkning av E_{v1} , E_{v2} och bärighetskvot.

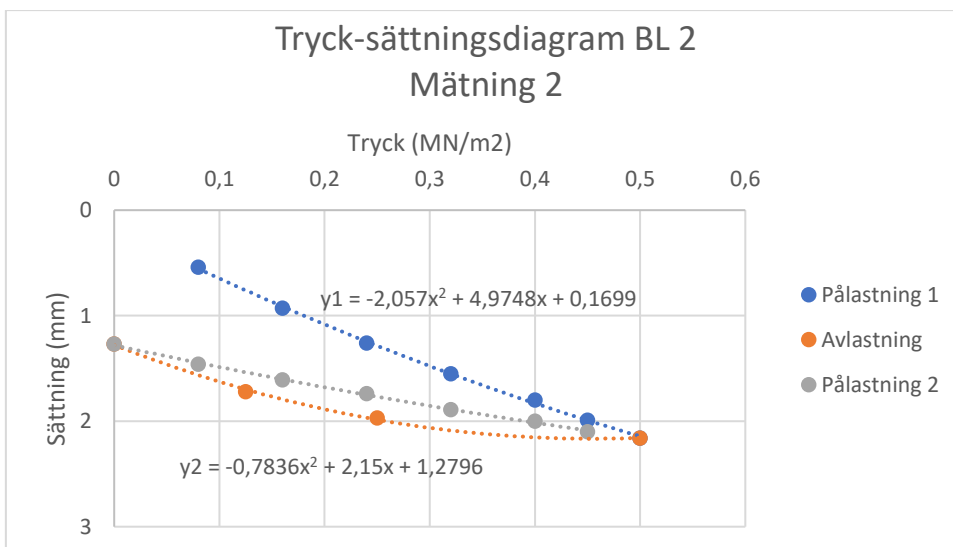
a0	-0,2821	a0	1,9411
a1	9,2153	a1	2,3201
a2	-5,2306	a2	0,116
Ev1	34,09090909	Ev2	94,61334679
Ev2/Ev1	2,775324839		

Punkt 2 – Bärlager betongkross (mätning 2)

Datum: 21/5–2021, 09.50. Väder: Molnigt, ca 10°C

Tabell 60. Mätvärden punkt 2, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,54
0,16	0,93
0,24	1,26
0,32	1,55
0,4	1,8
0,45	1,99
0,5	2,16
0,25	1,97
0,125	1,72
0	1,27
0,08	1,46
0,16	1,61
0,24	1,74
0,32	1,89
0,4	2
0,45	2,1



Figur 70. Tryck-sättningsdiagram punkt 2, bärlager.

Tabell 61. Beräkning av E_{v1} , E_{v2} och bärighetskvot.

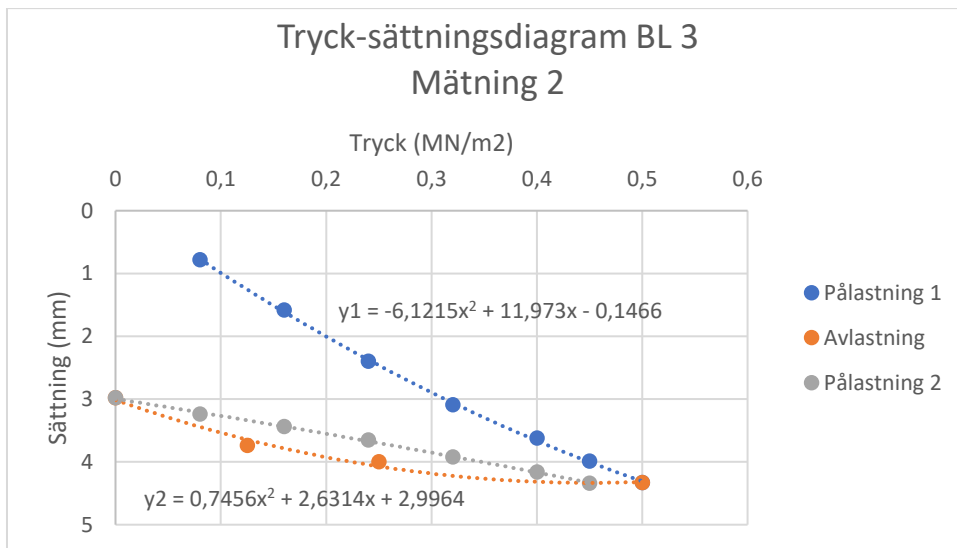
a0	0,1699	a0	1,2796
a1	4,9748	a1	2,15
a2	-2,057	a2	-0,7836
E_{v1}	57,01543218	E_{v2}	127,9718
E_{v2}/E_{v1}	2,244511432		

Punkt 3 – Bärlager asfaltgranulat (mätning 2)

Datum och tid: 21/5–2021, 11.00. Väder: Molnigt, ca 15°C

Tabell 62. Mätvärden punkt 3, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	0,78
0,16	1,58
0,24	2,4
0,32	3,09
0,4	3,62
0,45	3,99
0,5	4,33
0,25	4
0,125	3,74
0	2,98
0,08	3,24
0,16	3,44
0,24	3,65
0,32	3,92
0,4	4,16
0,45	4,34



Figur 71. Tryck-sättningsdiagram punkt 3, bärlager.

Tabell 63. Beräkning av E_{v1} , E_{v2} och bärighetskvot.

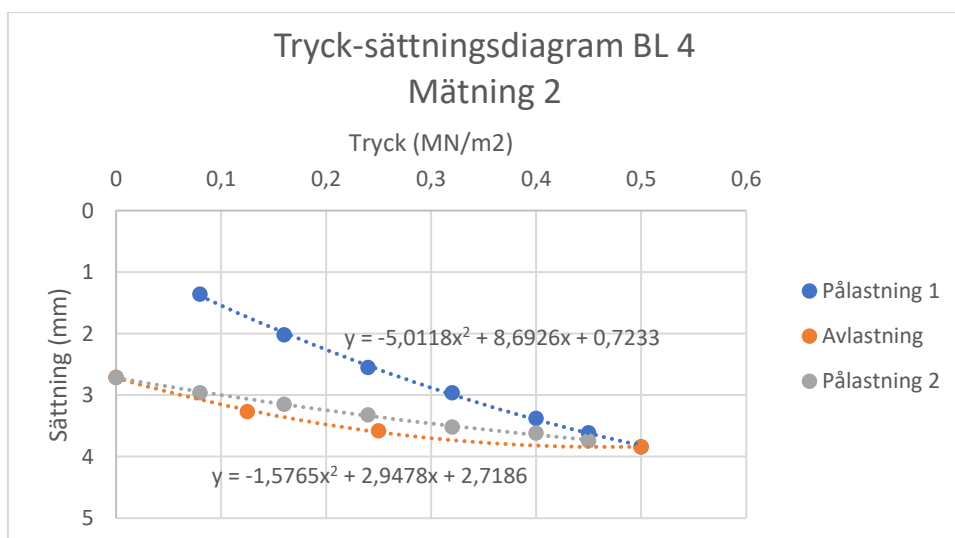
a0	0,1466		a0	2,9964
a1	11,973		a1	2,6314
a2	-6,1215		a2	0,7456
Ev1	25,24614996		Ev2	74,89515
Ev2/Ev1	2,966596765			

Punkt 4 – Bärlager asfaltgranulat (mätning 2)

Datum och tid: 21/5–2021, 12.00. Väder: Molnigt, ca 15°C

Tabell 64. Mätvärden punkt 4, bärlager.

Tryck (MN/m ²)	Sättning (mm)
0,08	1,36
0,16	2,02
0,24	2,55
0,32	2,96
0,4	3,38
0,45	3,61
0,5	3,84
0,25	3,58
0,125	3,27
0	2,71
0,08	2,96
0,16	3,15
0,24	3,32
0,32	3,52
0,4	3,62
0,45	3,74



Figur 72. Tryck-sättningsdiagram punkt 4, bärlager.

Tabell 65. Beräkning av Ev_1 , Ev_2 och bärighetskvot.

a0	0,7233		a0	2,7186
a1	8,6926		a1	2,9478
a2	-5,0118		a2	-1,5765
Ev1	36,36833853		Ev2	104,1884
Ev2/Ev1	2,864809798			