



Funktion och uppföljning av BGG (Blå-Grön-Grå) infrastruktur för klimatanpassning (Del 1)

Dimensionering, bärighet och infiltration

Fredrik Hellman
Erik Simonsen
Kent Fridell
Shafiqur Rahman
Björn Schouenborg

vti

VTI rapport 1239
Utgivningsår 2025
vti.se/publikationer

Funktion och uppföljning av Blå-Grön-Grå infrastruktur (BGG) för klimatanpassning (Del 1)

Dimensionering, bärighet och infiltration

Fredrik Hellman

Erik Simonsen

Kent Fridell

Shafiqur Rahman

Björn Schouenborg

Anders Junghage



Om inget annat anges är publikationen licensierad enligt [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/), omslaget omfattas inte av licensen./Unless otherwise stated, the publication is licensed under [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/), the cover is not included in the license.

Översatt titel: Function and follow-up of Blue-Green-Gray infrastructure (BGG) for climate adaptation, Part 1. Dimensioning, load-bearing capacity and infiltration.

Författare: Fredrik Hellman (VTI), Erik Simonsen (Heidelberg Materials), Kent Fridell (Edges), Shafiqur Rahman (VTI), Björn Schouenborg (RISE)

Diarienummer: 2023/0052-9.2

Publikation: VTI rapport 1239

Utgiven av VTI 2025

Publikationsuppgifter – Publication Information

Titel/Title

Funktion och uppföljning av Blå-Grön-Grå infrastruktur för klimatanpassning (BGG) Del 1.
Dimensionering, bärighet och infiltration./Function and follow-up of Blue-Green-Gray infrastructure
for climate adaptation (BGG) Part 1. Dimensioning, load-bearing capacity and infiltration.

Författare/Author

Fredrik Hellman (VTI, orcid.org/0000-0001-6122-8496)

Erik Simonsen (Heidelberg Materials)

Kent Fridell (Edges)

Shafiqur Rahman (VTI, orcid.org/0000-0002-5871-7587)

Björn Schouenborg (RISE)

Anders Junhage (Junhage Stenkonsult)

Utgivare/Publisher

VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut/
Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI)
www.vti.se/

Serie och nr/Publication No.

VTI rapport 1239

Utgivningsår/Published

2025

VTI:s diarienum/Reg. No., VTI

2023/0052-9.2

ISSN

0347–6030

Projektnamn/Project

Byggnation, funktion och uppföljning av multifunktionella konstruktioner för klimatanpassning./
Construction, function, and monitoring of multifunctional structures for climate adaptation.

Uppdragsgivare/Commissioned by

Vinnova, InfraSweden och Formas

Språk/Language

Svenska/Swedish

Kort sammanfattning

Klimatförändringar medför ökade nederbörds mängder, vilket ställer högre krav på dagvattenhantering i urbana miljöer. Traditionella dräneringssystem riskerar att överbelastas, särskilt i tätbebyggda områden med hårdgjorda ytor. Blå-Grön-Grå-konstruktioner (BGG) erbjuder en hållbar lösning genom att kombinera bärighet, dagvattenhantering och stöd för vegetation. Dessa konstruktioner har överbyggnad bestående av bergmaterial utan finmaterial med stort hålrum som tillfälligt kan lagra vatten och finns i två varianter: med dränerande ytbeläggning eller tät beläggning med infiltration via brunnar. I detta projekt har bärighet och infiltrationskapacitet undersökts på fyra platser i Sverige. Resultaten visar att BGG-konstruktioner uppnår likvärdig bärighet som traditionella lösningar och har mycket god infiltration även efter flera års drift. Projekteringsverktyget ERAPave (Elastic Response Analysis of Pavements – Performance Predictions) har använts för dimensionering, och rapporten innehåller även riktlinjer för materialval och upphandling. BGG-systemen visar stor potential för klimatanpassning av urbana ytor och kan med fördel användas på lågtrafikerade gator, gång- och cykelvägar samt torg.

Nyckelord

Klimatanpassning, översvämningar, dagvattenhantering, Blå-Grön-Grå-konstruktioner (BGG), dränerande ytbeläggning, öppna förstärkningslager, ERAPave.

Abstract

Climate change is leading to increased precipitation, placing greater demands on stormwater management in urban areas. Traditional drainage systems are often insufficient, especially in densely built environments with impervious surfaces. Blue-Green-Grey (BGG) constructions offer a sustainable solution by combining structural load-bearing capacity, stormwater management, and support for vegetation. These systems feature a porous substructure of rock materials without fines that temporarily store water and are available in two types: with permeable surface layers or sealed surfaces with infiltration via inlets and drains. This project evaluated the load-bearing capacity and infiltration performance of BGG constructions at four locations in Sweden. Results show that BGG systems achieve comparable structural performance to conventional designs and maintain excellent infiltration capacity even after several years of use. The ERAPave (Elastic Response Analysis of PAVements – Performance Prediction) design tool was used for planning, and the report includes guidelines for material selection and procurement. BGG systems show strong potential for climate adaptation in urban environments, particularly on low-traffic streets, pedestrian and bicycle paths, and public squares.

Keywords

Climate adaptation, flooding, stormwater management, Blue-Green-Grey constructions (BGG), Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), permeable surface layer, open-graded base layers, ERAPave.

Innehållsförteckning

Publikationsuppgifter – Publication Information	5
Kort sammanfattning.....	6
Abstract	7
Sammanfattning	10
Summary	11
Förord.....	12
Kontaktuppgifter till projektpartners.....	13
1. Inledning	15
2. BGG-konstruktioners funktion.....	17
2.1. Dränerande beläggning	17
2.2. Tät beläggning.....	19
3. Materialegenskaper hos makadam till BGG-konstruktioner	21
3.1. Hållrumshalt/porositet:.....	21
3.2. Permeabilitet:	22
3.3. Porstorlek:	22
4. Krav på material till öppna konstruktioner	23
4.1. Fog- och sättmaterial.....	23
4.1.1. Obundet bär- och förstärkningslagermaterial	23
4.2. Bärlager av dränerande asfalt (ABD) eller asfaltgrus (AG).....	25
4.3. Dränerande markstensbeläggning	26
5. BGG-konstruktioners bärighet.....	27
6. Dimensionering av BGG-konstruktioner kommunperspektivet.....	30
6.1. Bärighetsdimensionering – Klimatpåverkan.....	31
6.2. Bärighetsdimensionering – trafikbelastning.....	31
6.3. Hydraulisk dimensionering	32
6.4. Konstruktionstekniska lösningar.....	32
6.5. Utförande	33
6.6. Drift och underhåll.....	34
6.7. Uppföljning	35
6.8. Tabelldimensionering – bärighet.....	36
6.8.1. Trafikklass	36
6.8.2. Klimatzon.....	37
6.8.3. Materialtyp i terrassen.....	38
6.9. ERAPave – ett dimensioneringsverktyg	39
6.9.1. Hur använder man ERAPave?	39
7. Bärighetsmätning med fallvikt.....	43
7.1. Mätning med fallvikt.....	43
7.2. Hur kan resultaten tolkas och vad betyder de i praktiken?	44
8. Resultat från fallviktsmätning	46
8.1. Fallvikt Uppsala kommun – Rosendal	46
8.1.1. Resultat	47

8.2. Fallvikt Campus i Vellinge	53
8.2.1. Resultat	53
8.3. Fallvikt Ängelholms kommun - Munka Ljungby	59
8.3.1. Resultat	60
8.4. Fallvikt Vara	64
8.4.1. Resultat	64
9. Infiltrationsmätning på dränerande beläggningar	68
9.1. Hur estimeras beläggnings infiltrationskapacitet?.....	68
9.1.1. Initial infiltrationskapacitet.....	69
9.1.2. Förändring av infiltrationskapacitet över tid.....	69
9.1.3. Intensitet för dimensionerande nederbörd.....	70
9.1.4. Sätter fogarna igen i dränerande beläggningar?.....	71
10.Resultat från Infiltrationsmätning.....	73
10.1. Infiltrationsmätning i Vara.....	74
10.2. Infiltrationsmätning vid Campus Vellinge.....	78
11.Diskussion och slutsatser	80
11.1. Bärighet – fallviktsmätning.....	80
11.2. Infiltrationskapacitet	80
11.3. Rekommendationer framåt.....	81
Referenser	82

Sammanfattning

Pågående klimatförändringar gör att vi kan förvänta oss mer extrema väderförhållanden med större mängder dagvatten än normalt, som ofta överstiger kapaciteten hos dräneringssystemen. För ett uppskattat scenario för hur klimatet kommer att utvecklas i Sverige beräknas nederbörden i ett 100-årsperspektiv öka i storleksordningen 20–30 procent (www.smhi.se).

I tätorter är en stor del av ytorna täta, vilket resulterar i minskad naturlig infiltration av regn. När städerna byggs allt tätare behöver mer vatten ledas ner i dagvattensystemen. När systemen blir fulla trycks vatten tillbaka upp till ytan, och vid intensivt regn resulterar det i värsta fall till översvämningar, vattenfyllda källare, skador på byggnader och andra negativa konsekvenser.

Ett sätt att minska risken för översvämningar, förenkla hanteringen av dagvatten och ge goda förutsättningar för vegetation är att använda Blå-Grön-Grå-konstruktioner (BGG). Gemensamt för dessa är en underbyggnad med stor andel porer vilket gör att dagvatten tillfälligt kan lagras. De öppna bergmaterialen kan också ge förutsättningar för vegetation. Det finns två olika typer av BGG, de med infiltration från ytan genom en dränerande ytbeläggning och de med tät beläggning och infiltration via brunnar och sidointag.

BGG-konstruktioner har utvecklats och testats i två tidigare 1) Vinnova-projekt: ”Grå-gröna systemlösningar för hållbara städer” och dess fortsättning 2) ”Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor”. Resultaten från dessa projekt finns på www.klimatsakradstad.se och visar att med korrekt konstruktionsdesign och utförande ger dessa konstruktioner samma bärighet som traditionella täta beläggningskonstruktioner. BGG-konstruktioner kan med fördel användas på lågtrafikerade gator, gång-cykelvägar, parkeringsplatser och torgområden. I ett fortsättningsprojekt [Byggnation, funktion och uppföljning av multifunktionella konstruktioner för klimatanpassning | Infra Sweden](#) försätter vi följa gamla och nya konstruktioner för att se på funktionen över längre tid. Dessa resultat kommer att presenteras i del 2 av denna rapport.

Detta projekt har undersökt och följt upp bärighet med hjälp av fallviktsdeflektometer (FWD) och andra mätningar på redan byggda ytor på fyra olika platser: Uppsala Rosendal, Ängelholm (Munka Ljungby), Campus Vellinge och Vara (en industrihandelsyta) för att verifiera konstruktionernas prestanda. Både konstruktioner med tät ytbeläggning och dränerande ytbeläggning har provats. En preliminär slutsats utifrån denna första uppföljning är att bärigheten på BGG-konstruktioner med öppen underbyggnad är likvärdig med konventionella konstruktioner. Infiltrationskapacitet har undersökts på två platser med dränerande beläggning, en i Vara och en vid Campus Vellinge. Infiltrationen bedöms som mycket god för båda konstruktionerna efter några års drift. Rapporten innehåller även en beskrivning av hur beläggningsdesignverktyget ERAPave (Elastic Response Analysis of PAVements – Performance Prediction) kan användas för projektering av BGG-konstruktioner. Vidare beskrivs även funktion och upphandling av material för byggnation av BGG-konstruktioner.

Summary

Ongoing climate change means that we can expect more extreme weather conditions with larger amounts of stormwater than normal, which often exceeds the capacity of the drainage systems. For an average scenario for how the climate will develop in Sweden, precipitation is estimated to increase in the order of 20–30 percent in a 100-year perspective (www.smhi.se).

In urban areas, a large part of the surfaces is dense, which results in reduced natural infiltration of rain. As cities are built increasingly densely, more water needs to be directed into the stormwater systems. When the systems become full, water is pushed back up to the surface, and in the event of intense rain, this results in the worst-case scenario in flooding, water-filled basements, damage to buildings and other negative consequences.

One way to reduce the risk of flooding, simplify the management of stormwater and provide good conditions for vegetation is to use Blue-Green-Gray structures (BGG). Common to this is a substructure with a large proportion of pores, which means that stormwater can be temporarily stored. The open rock materials can also provide conditions for vegetation. There are two different types of BGG, those with infiltration from the surface through a draining surface coating and those with dense coating and infiltration via wells and side intakes.

BGG structures have been developed and tested in two previous Vinnova projects: “Grey-green system solutions for sustainable cities” and its continuation 2) “Climate-proof system solutions for urban areas”. The results from these projects are available at www.klimatsakradstad.se and show that with correct structural design and execution, these structures provide the same load-bearing capacity as traditional dense pavement structures. BGG structures can be used to advantage on low-traffic streets, pedestrian and cycle paths, parking lots and square areas. In a follow-up project, [Byggnation, funktion och uppföljning av multifunktionella konstruktioner för klimatanpassning | Infra Sweden](#), we continue to monitor both old and new structures to assess their performance over time. These results will be presented in Part 2 of this report.

This project has investigated and followed up the bearing capacity using a falling weight deflectometer (FWD) and other measurements on already built surfaces at four different locations. Uppsala Rosendal, Ängelholm (Munka Ljungby), Campus Vellinge and Vara (an industrial and commercial area) to verify the performance of the structures. Both structures with dense surface covering and draining surface covering have been tested. A preliminary conclusion based on this first follow-up is that the bearing capacity of BGG structures with open substructure is equivalent to conventional structures. Infiltration capacity has been investigated at two locations with draining surface covering, one in Vara and one at Campus Vellinge. Infiltration is assessed as very good for both structures after a few years of operation. The report also contains a description of how the pavement design tool ERAPave (Elastic Response Analysis of PAVements – Performance Prediction) can be used for the design of BGG structures. Furthermore, the function and procurement of materials for the construction of BGG structures are also described.

Förord

Resultaten i denna rapport baseras på: ”Multifunktionella urbana dagvattenanläggningar”. Formas har delfinansierat projektet inom ramen för programmet ”Från forskning till praktik – metoder och verktyg, med inriktning mot kunskapsöverföring av forskningsresultat”. Det projektet i sin tur baseras på det av Vinnova finansierade UDI-projektet Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor.

Målet med dessa projekt har varit att snabba på implementeringshastigheten. Detta har framför allt skett genom kunskapsinformation men även uppföljning av piloter och andra aktiviteter/resultat inom det tidigare projektet, www.klimatsakradstad.se.

En fortsättning av denna rapport (del 2) med nya resultat kommer att publiceras inom ramen för Infrasweden (Vinnova) projektet ”Byggnation, funktion och uppföljning av multifunktionella konstruktioner för klimatanpassning.” [Byggnation, funktion och uppföljning av multifunktionella konstruktioner för klimatanpassning | Infra Sweden](#)

Medverkande i projektet:

- RISE: Björn Schouenborg (projektledare), Emil Stenberg, Magnus Döse och Johan Gunnarsson
- VTI: Fredrik Hellman och Shafiqur Raman
- Edge: Kent Fridell och Martin Vysoký
- Heidelberg Materials och AB/Svensk Markbetong: Erik Simonsen
- AB Anders Junghage: Anders Junghage.

Vi tackar Vinnova och Infrasweden för det finansiella bidraget och samarbetet under projektet samt alla personer från kommuner/städer som bidragit i väldigt många olika former och möjliggjort projektet. Även granskarare Lina Nordin och Björn Kalman tackas för värdefulla kommentarer som förbättrat rapporten.

Linköping, juni 2025

Fredrik Hellman
Projektledare

Granskare/Examiner

Lina Nordin VTI

De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är författarens/författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis myndigheten VTI:s uppfattning./The conclusions and recommendations in the report are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of VTI as a government agency.

Publikationen godkänd för publicering/Publication approved for publication

Björn Kalman, VTI.

Kontaktuppgifter till projektpartners



Björn Schouenborg

Seniorforskare på RISE. Doktor i Geologi (Mineralogi & Petrologi) med kompetens bl.a. om samhällsbyggnation, materialkompetens, vägbyggnation, standardisering, provning och projektledning.

Mail: <mailto:bjorn.schouenborg@ri.se>

Webbadress: www.ri.se



Kent Fridell

En av Sveriges ledande experter inom hållbar stadsutveckling med Blågröngrå infrastruktur (BGG-system) för återanvändande, fördröjning och rening av drän- och dagvatten. Kent är landskapsingenjör och har därutöver en magisterexamen med inriktning mot hydrogeologi och geoteknik från SLU.

Mail: kent.fridell@edges.se

Webbadress: www.edges.se



Erik Simonsen

Erik Simonsen är senior utvecklingsledare på Heidelberg Materials och ordförande i Svensk Markbetong. Technologie doktor i Vägteknik och är expert inom vägdimensionering och öppna konstruktioner och författare till handboken "Dränerande markstensbeläggningar". Erik har mer än 25 års erfarenhet av vägkonstruktion för kommunala applikationer, både med asfalt- och betongbeläggningar.

Mail: erik.simonsen@heidelbergmaterials.com

Webbadress: <https://www.cement.heidelbergmaterials.se>,
www.svenskmarkbetong.se



Fredrik Hellman

Forskningsledare på VTI på avdelningen Väg- och banteknik. Doktor i Geologi (Mineralogi & Petrologi). Kompetens inom vägteknik, obundna vägbyggnadsmaterial, materialkaraktärisering, återvinning och klimatanpassningsfrågor.

Mail: fredrik.hellman@vti.se

Webbadress: www.vti.se



Shafiqur Rahman

Seniorforskare på VTI på avdelningen Väg- och banteknik. Teknologie doktor i vägteknik (obundna material). Kompetens inom vägteknik, vägdimensionering, vägbyggnadsmaterial, materialkaraktärisering, återvinning och klimatanpassningsfrågor.

Mail: shafiqur.rahman@vti.se

Webbadress: www.vti.se



Anders Junghage

Stenexpert av Sveriges Stenindustri utsedd sakkunnig. Anders har skrivansvar för samtliga natur- och betongstenskoderna i AMA 23 och koderna för de öppna förstärkningslagren. Han har tillsammans med Erik Simonsen skrivit handboken "Dränerande markstensbeläggningar".

Mail: anders@junghage.nu

Webbadress: <http://www.junghage.nu>

1. Inledning

Pågående klimatförändringar innebär att vi kan vänta oss mer extrema vädersituationer med större dagvattenmängder att hantera än vad vi är vana vid och våra system är utformade för. För ett medelscenario för hur klimatet kommer att utvecklas i Sverige uppskattas att regnen i ett 100-årsperspektiv kommer att öka i storleksordningen 20–30 procent (www.smhi.se).

I tätbebyggt område är en stor del av ytor täta och regnvatten har ingen naturlig infiltrationsmöjlighet. Problemet är att när städerna byggs tätare och infiltrationsytor försvinner så leds mer och mer vatten ner i dagvattensystemen. När den dimensionerade kapaciteten överskrids trycks vatten tillbaka upp till ytan. Ibland har inlopp, rör och brunnar blivit blockerade. Vid intensivare regn har inte vattnet någonstans att ta vägen och resultatet blir i värsta fall översvämningar, vattenfyllda källare, skador på kringliggande byggnader och många andra negativa konsekvenser.

Ett sätt att minska risken för översvämningar, förenkla hanteringen av dagvatten samt tillgodose goda betingelser för växtlighet är att använda Blå-Grön-Grå-konstruktioner (BGG). Gemensamt för dessa är förstärkningslager med stor hålrumsandel som medför att dagvatten kan infiltrera och magasineras i vägkonstruktionen. På så sätt kan konstruktionen användas som ett tillfälligt fördröjningsmagasin och kan avlasta dagvattensystemet under ett kraftigt regn. Det öppna förstärkningslagret möjliggör även bättre livsbetingelserna för växtlighet samt en naturlig grundvattenbildning.

BGG-konstruktioner har tagits fram och testats i två Vinnovaprojekt: 1) Grå-gröna systemlösningar för hållbara städer och dess fortsättning 2) Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor”. Resultaten från dessa projekt finns på www.klimatsakradstad.se och visar att med rätt dimensionering och utförande ger dessa konstruktioner samma tillståndsutveckling som traditionella konstruktioner. BGG-konstruktioner kan användas på lågtrafikerade ytor, gång-cykelbanor, parkeringsplatser och torgytor. Resultaten av dessa projekt är att materialspecifikationer och konstruktionerna är införlivade i Svensk Byggtjänsts regelverk AMA [1]. Det underlättar upphandling och byggnation av BGG-konstruktionerna. Det har gjort att det byggts BGG-konstruktioner i flera kommuner. En av osäkerheterna för byggnation och användning av BGG-system på ytor för trafik är oro för ökade underhållskostnader och de inte kommer hålla lika bra för trafikbelastning som standardlösningar. För ytor som har dränerande ytskikt finns dessutom en oro att infiltrationskapaciteten ska minska och medföra dyrt underhåll och reparationer. Det har gjort att man på flera platser valt att inte bygga BGG-system där det annars varit lämpligt. Detta är anledningen till att vi har ett fortsättningsprojekt [Byggnation, funktion och uppföljning av multifunktionella konstruktioner för klimatanpassning | Infra Sweden](#). I detta projekt försätter vi följa gamla och nya konstruktioner för att se på funktionen över lång tid. Dessa resultat kommer att presenteras i del 2 av denna rapport.

Syftet med denna (del 1) undersökning var att göra en upp redan byggda BGG-ytor och jämföra dessa standardmässigt byggda ytor och studera deras bärighet. Dessutom har infiltrationskapaciteten följts upp på några ytor som har dränerande ytskikt. Arbetet är en första studie för att undersöka hur funktionen ändras över tid och öka kunskapen om dessa konstruktioner. Detta gör att osäkerheterna kring konstruktionstypen minskar och öppnar upp för en bredare användning av BGG.

Rapporten är tänkt att ge kommuner en övergripande beskrivning av hur BGG-systemen fungerar och vilka krav man bör ställa på material. Generella aspekter på utförande, materialegenskaper, drift och underhåll beskrivs översiktligt. Rapporten innehåller även en beskrivning av hur dimensionering kan göras utifrån det kommunala perspektivet samt hur dimensioneringsverktyget ERAPave (Elastic Response Analysis of PAVements – Performance Prediction) kan användas för BGG-konstruktioner.

Rapporten redovisar en första uppföljning av BGG-system efter några års drift. Bärighet har följts upp med fallviktsdeflektometer (FWD – Falling Weight Deflektometer). Det är en oförstörande standardprovning som ger kunskap om styvheten i konstruktioner. Resultaten kan användas för att jämföra styvheten på BGG-konstruktioner med data från standardkonstruktioner. Det ger en indikation

på hur väl konstruktioner tål trafikbelastning. Konstruktionernas allmänna kondition med avseende på sprickor skador och deformationer har också gjorts vid mättillfället. Mätning av infiltrationskapacitet på ytor med dränerande ytskikt ger information det finns problem med igensättning efter några års användning. De konstruktioner som har undersökts i denna undersökning är redan byggda ytor på fyra olika platser [27]: Uppsala Rosendal, Ängelholm (Munka Ljungby), Vellinge och Vara för att verifiera konstruktionernas funktion och prestanda. Dessa platser har valts för att det finns tillräcklig dokumentation om vilka material som använts och att konstruktionsritningar finns bevarade.

2. BGG-konstruktioners funktion

I sitt allra enklaste utförande består en BGG-konstruktion av ett öppet förstärkningslager under en överliggande konstruktion. Förstärkningslagret utgör volymmässigt det avsevärt största lagret i överbyggnaden, ca 70 procent. I ett historiskt perspektiv är förstärkningslagrets enda uppgift att ge bärighetshöjande egenskaper till överbyggnaden.

Man skiljer på två typer av BGG-konstruktioner de med 1) Dränerande beläggning 2) Tät beläggning. I konstruktioner med tät hårdgjord yta infiltreras dagvatten via brunnar eller sidointag, de med dränerande beläggning har infiltration via ytan tex markstenens fog eller en dränerande asfalt. Vattnet magasineras temporärt i förstärkningslagret och transporteras sedan vidare antingen lokalt ner i marken, eller via dagvattensystemet.

Över det öppna förstärkningslagret kan en rad olika typer av konstruktioner anläggas beroende på vilken funktion man är ute efter. Exempel på konstruktioner som kan kopplas samman med det öppna förstärkningslagret är regnbädd, vegetationsyta, trafikerad hårdgjord yta, trafikerad dränerande beläggning och träd i hårdgjord yta. Exempel på olika konstruktioner finns i handboken Levande stadsrum (2019) [10].

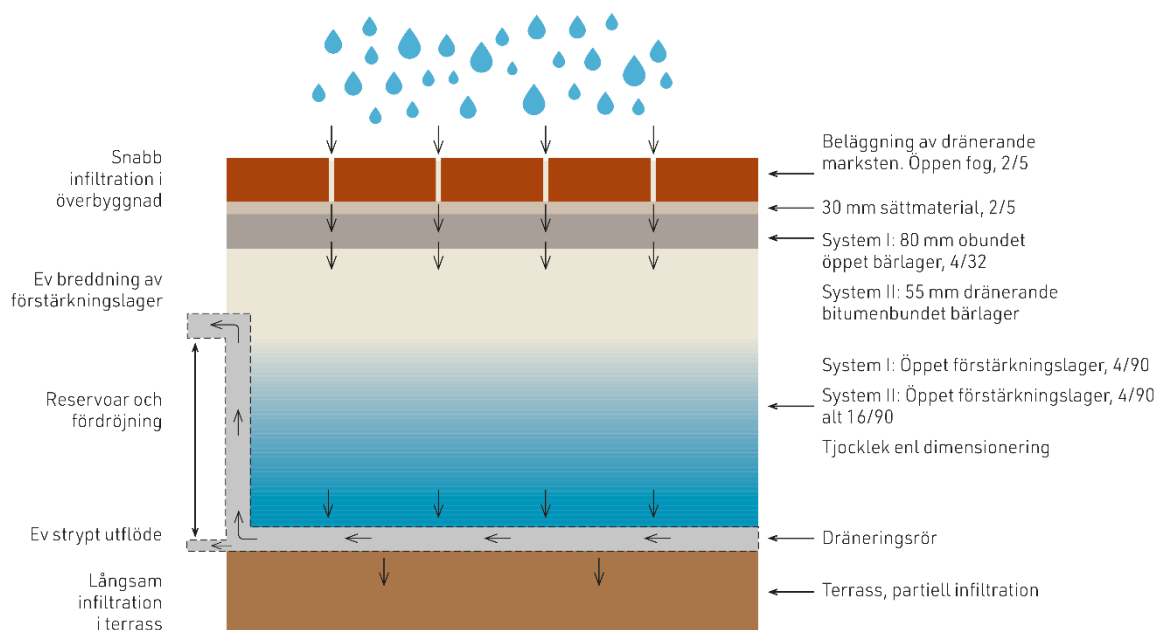
2.1. Dränerande beläggning

Om infiltration sker via beläggningsen används normalt dränerande markstensbeläggning [7] . Konstruktioner med dränerande markstensbeläggning delas in i två huvudgrupper: Dränerande obunden konstruktion (System I) och dränerande bitumenbunden konstruktion (System II) enligt Figur 2-1. Obunden konstruktion (System I enligt Figur 2-1) kan användas i trafikklass 0 till och med 2 och bitumenbunden konstruktion (System II enligt Figur 2-1) i högre trafikklasser.

I system II används ett dränerande bitumenbundet bärlager för att höja bärigheten och minska risken för spårbildning på ytan. Båda systemen omhändertar dagvatten via infiltration genom beläggningsen. I båda konstruktionerna infiltreras regn genom markstensbeläggningsen och vidare ner genom överbyggnaden för att så småningom nå undergrunden. Behovet av dräneringsledningar styrs av hur mycket dagvatten som kan infiltrera i terrassen (full- eller partiell infiltration). Vid full infiltration går allt dagvattnet vidare till terrass och undergrund. Det kan dock finnas faktorer som fordrar begränsat infiltration i terrassen (partiell infiltration). Om undergrunden bara klarar att infiltrera mindre volymer så är det enkelt att leda bort delar av nederbörden till det befintliga dagvattensystemet med hjälp av ett strypt utflöde.

Fördröjning och lagring sker i ett öppet förstärkningslager av makadam och till viss del i den underliggande marken. Hur mycket vatten som kan fördröjas beror på magasinets storlek d v s. förstärkningslagrets tjocklek. Hur länge vattnet fördröjs i konstruktionen beror på terrassmaterialens hydrauliska egenskaper och hur eventuella dräneringsrör är dimensionerat [7]. Om man vill minska risken för att fördröjningsmagasinet överfylls kan ett bräddavlopp installeras vid en given nivå. När nederbörden minskar töms förstärkningslagret genom infiltration till terrassen och eventuellt via strypt utflöde till närliggande dagvattensystem.

Denna konstruktionstyp kan användas på nästan alla typer av terrassmaterial och ger stora möjligheter att kontrollera fördröjnings- och tömningstid. Eftersom infiltrationen sker över hela beläggningsens yta blir infiltrationshastigheten och även koncentrationen av eventuella föroreningar såsom partiklar från trafiken låg.



Figur 2-1 BGG-konstruktion med infiltration via dränerande marksten. System I obunden överbyggnad och System II bitumenbunden konstruktion[7].

Infiltrationen genom beläggningen sker genom fogen eller perkolationsöppningar. Tillgänglig area för infiltration är normalt större än 12 procent av belägningsarean. Fogmaterialet utgörs av makadam i sorteringen 2/5. Större fogarea ger initialt något högre infiltrationskapacitet men ger samtidigt lägre lastspredande förmåga. För obelastade ytor kan tillgänglig fogarea för infiltration ökas till ca 20 procent vid behov. Den absolut viktigaste faktorn för beläggningens infiltrationskapacitet är dock fogmaterialets infiltrationsförmåga, dvs permeabilitet. Ytavrinning sker bara om nederbördens intensitet överskrider beläggningens infiltrationsförmåga eller om magasinet är underdimensionerat.



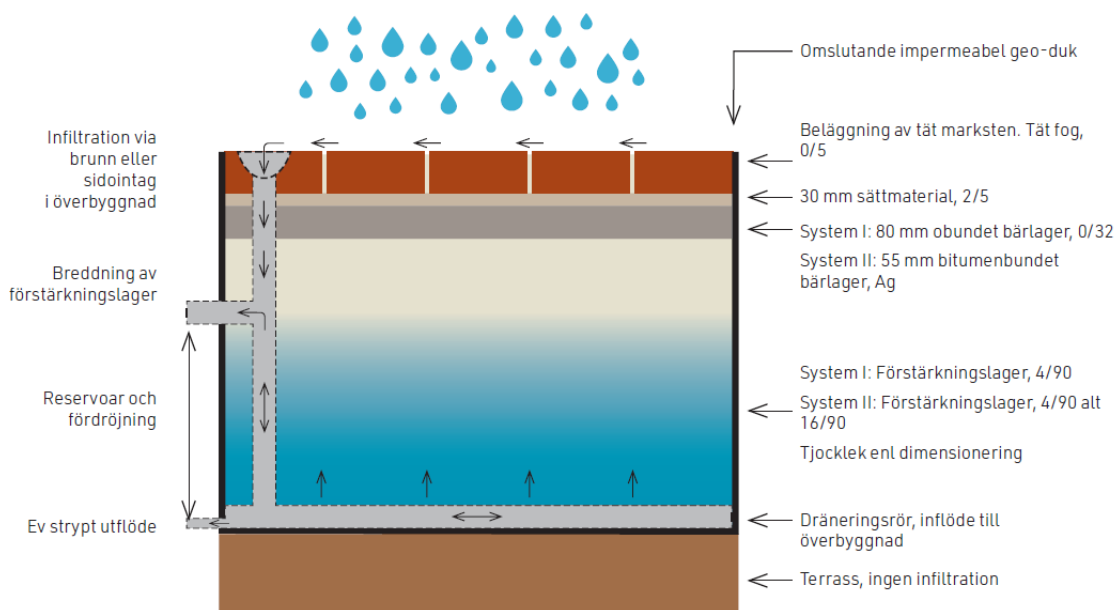
Figur 2-2 Dränerande markstensbeläggning (Delta Drain) med ca 13 procent area tillgänglig för infiltration (Foto Erik Simonsen).

2.2. Tät beläggning

I stället för att infiltrera direkt via beläggningen kan dagvatten ledas in i konstruktionen via brunnar eller annan typ av sidointag. Från brunnarna leds dagvattnet in i konstruktionen (förstärkningslagret) via dräneringspunkter. Eftersom infiltrationen inte sker via beläggningen kan bundna bärlager av typ AG (Asfalt Grus) användas. Detta ger möjlighet för mycket hög bärighet och konstruktionen kan därför användas i tungt trafikerade miljöer.

Om terrassen har mycket låg infiltrationsförmåga (hydraulisk konduktivitet), låg bärighet, eller när infiltration av ytvatten från vägområdet inte är önskvärd (som exempelvis ovanpå ett grundvattenmagasin) kan konstruktionen omslutas av en geoduk eller motsvarande impermeabelt membran eller barriär. Konstruktionstypen är också lämpligt för förorenade platser där man inte vill orsaka ökat läckage av föroreningar p g a tillflöde av vatten. I denna konstruktion används dräneringsrör som fördröjer och leder bort vatten från magasinet till omgivande dagvattennät, reningsverk eller liknande. Systemet kan även användas för att samla vatten till bevattning eller andra ändamål.

För bitumenbunden konstruktion med tät beläggning rekommenderas inte full infiltration av dagvatten till undergrund. Det beror på att vid intensiv nederbörd kan höga flöden uppstå vid brunnar och intag, vilket gör att dagvattnet inte kan distribueras ut jämt till terrassen. Samma resonemang gäller även förmågan att bryta ned föroreningar. Eventuella föroreningar från trafik o.d. koncentreras till området närmast intag eller brunn, och överbyggnadens förmåga att bryta ned dessa kan då minska kraftigt.



Figur 2-3 BGG-konstruktion med tät beläggning och infiltration via brunnar [7]Fördelar med BGG-konstruktioner.

Traditionell byggteknik medför en enkel och billig konstruktion, men samtidigt utgör den enorma volymen (över 40 miljoner kubikmeter förstärkningslagermaterial) av överbyggnader som årligen byggs en outnyttjad samhällsresurs. Genom att öppna upp överbyggnaden för infiltration av regnvatten kan, genom moderna byggmetoder och material, både mycket hög bärighet säkerställas samtidigt som stora mängder dagvatten kan magasineras och renas innan det leds till dagvattensystemet.

I Sverige har ett 50-tal BGG-konstruktioner byggts de senaste åren men möjligheten till långtidsuppföljning är naturlig nog begränsad [27]. Internationellt har dock tekniken med öppna konstruktioner under lång tid haft stora framgångar, framför allt i länder med strängare nationella krav

kring exploatering och dagvattenhantering([4], [15], [20], [25]). Internationell forskning har visat på många miljömässiga och ekonomiska fördelar, såsom:

- Fördröjning av flödestoppar vid intensiv nederbörd. Det avlastar dagvattensystemet betydligt.
- Upp till 100 % infiltration av dagvatten. Det fördröjer eller förhindrar avrinningen och minskar risken för skador på intilliggande konstruktioner vid intensiv nederbörd.
- Reducerar eller eliminerar behovet av dräneringsledningar och brunnar.
- Eliminerar kvarstående vatten på ytan. Eftersom allt ytvatten infiltreras i överbyggnaden kommer inget kvarstående vatten samlas i ytliga svackor eller hjulspår.
- Bärighet som motsvarar traditionella överbyggnader. Moderna byggtekniker och material, kunnigt utförande och kontroll ger samma förutsättningar som traditionella överbyggnader med avseende på bärighet och livslängd.
- Dränerande markstenskonstruktioner är inte mera känsliga för frost och tjäle än andra konstruktioner.
- Vattenbalansen mellan luft och mark bibehålls på en naturlig nivå. Detta innebär att dränerande markstensbeläggningar inte bidrar till ”Heat Island”-effekten på samma sätt som en tät, mörk asfaltbeläggning gör.
- Bidrar till grundvattenbildningen i städerna. Genom att låta magasinerat vatten långsamt exfiltrera via terrassen tillförs nytt vatten till grundvattnet på ett naturligt sätt.
- Filtrerar och fångar upp ej nedbrytbara föroreningar (exempelvis tungmetaller och sediment). Upp till 95 % av dessa fångas upp i överbyggnadens övre delar, framför allt i sättmaterialet.
- Genom biodegradering renas vattnet på sin väg vidare ned i undergrunden. De flesta av det moderna samhällets föroreningar, både organiska och oorganiska kemikalier, utsätts för nedbrytning (biodegradering) av enzymer genom mikroorganismers aktivitet.

3. Materialegenskaper hos makadam till BGG-konstruktioner

I traditionella konstruktioner består förstärkningslager av samkross 0/90, dvs krossat berg, vilket är ett tätt material med relativt litet hålrum, ca 20–25 procent. I BGG-konstruktioner består förstärkningslagret av makadam. Makadam är ett krossat bergmaterial där de minsta stenpartiklarna har siktats bort. Makadam till förstärkningslager finns eller kan tillverkas i många olika sorteringar tex 4/90, 16/90, 22/90, 32/64 eller 32/90. Makadam har högre porositet (30–40 % beroende på fraktion) jämfört med samkross, men framförallt är permeabiliteten mycket högre. Lokal tillgång beror i första hand på tillverkarens massbalans och kundefterfrågan.

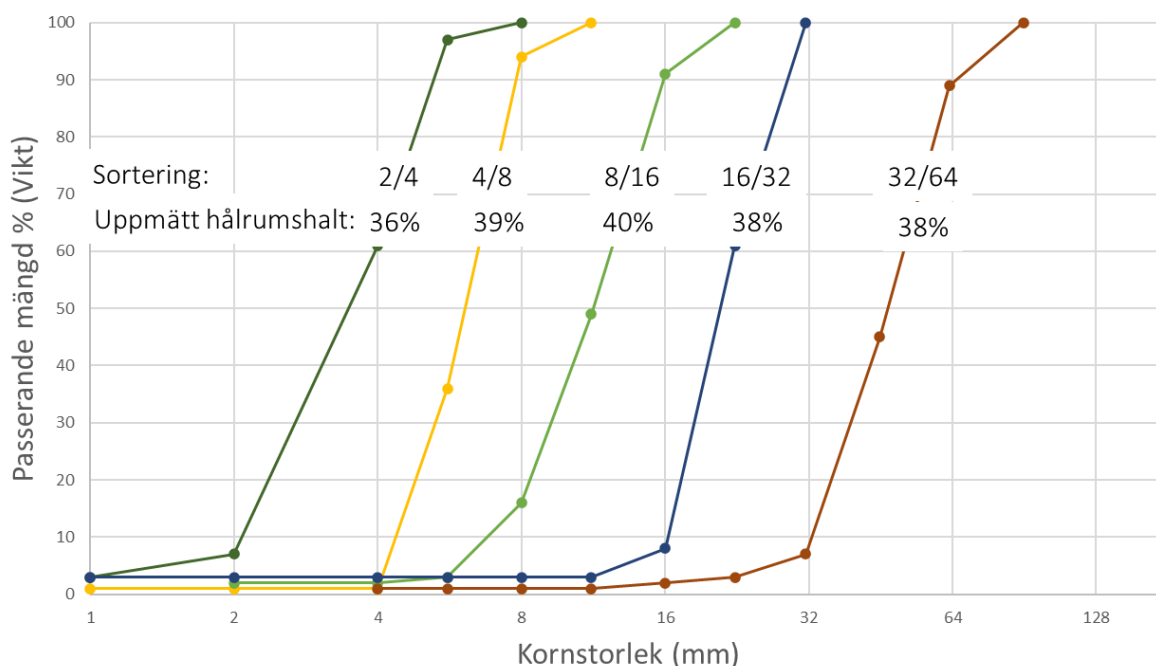
BGG-systemens övergripande egenskaper beror på flera faktorer tex hur systemet är sammankopplat, hur vatten tas in i konstruktionen hur eventuella rörledningar är dimensionerade, hur drift och underhåll genomförs osv. Tre grundläggande materialegenskaper hos förstärkningslagret är dock avgörande för systemets funktion; Hålrums halt, permeabilitet och porstorlek [7].

3.1. Hålrums halt/porositet:

Makadam har normalt en hålrums halt mellan 30 och 40 procent. Hålrums halten anger med andra ord hur stor andel av materialet som är luft och därmed tillgänglig för att magasinera dagvatten. En kubikmeter förstärkningslager av makadam med hålrums halten 40 procent kan magasinera 400 liter vatten. För en 10 meter bred gata motsvarar det 4 000 liter vatten per meter gata!

Som tumregel ökar hålrums halten när kvoten mellan största och minsta stenstorlek minskar, tex har ett makadam 32/64 ($64/32=2$) något högre hålrums halt än 32/90 ($90/32\approx3$). Mängden över- och underkorn har också stor betydelse för hålrums halten. Underkorn och överkorn är den del av materialet som faller utanför materialets nedre och över kornstorleksgräns. Dvs. för ett 32/64 material utgörs underkorn av material mindre än 32 mm och överkorn material större än 64 mm. I ett CE-deklarerat makadam kan mängden över- och underkorn uppgå till 40 procent av totala vikten.

Värt att notera är att i öppet graderat makadam, t.ex. 8/16, 16/32 och 32/64 osv, skiljer sig inte hålrums halten nämnvärt mellan olika graderingar och ligger normalt mellan 30 och 40 %. Detta förutsätter samma mängd under- och överkorn, packningsgrad och partikelform. Rundade partiklar drar ned porositeten och skarpkantade partiklar ökar porositeten [26]



Figur 3-1 Kornstorleksfördelning och hålrumsalter för olika makadam (Illustration Erik Simonsen).

3.2. Permeabilitet:

Permeabiliteten anger hur snabbt vatten kan strömma igenom materialet. Förstärkningslagrets permeabilitet påverkar tex hur snabbt konstruktionen töms för vatten efter varje nederbördstillfälle. Permeabiliteten påverkar även i förlängningen om det hinner bildas stående vatten på vägytan vid intensiva regn.

Permeabiliteten hos en grovkornig makadam styrs i första hand av storleken på öppningen mellan porerna, den sk porhalsen. Om porhalsen täppts igen av mindre korn sjunker permeabiliteten. Materialets "finsvans" dvs den 5 till 10 procent (vikt) minsta andelen av materialet blir därför avgörande för hur hög permeabiliteten blir. Hålrumsalter/porositet är endast en indirekt indikator på högre permeabilitet. Mängd samt storlek på materialets underkorn är direkt avgörande för permeabiliteten.

3.3. Porstorlek:

För att växtlighet ska trivas och utvecklas, behövs utrymme för rötternas tillväxt och gasutbyte. Precis som stenstorleken varierar porstorleken i ett givet material. Som tumregel ökar porstorleken med ökande stenstorlek, dvs ett 32/64 material har större genomsnittlig porstorlek än motsvarande 16/32 material. I välgraderade material är sambandet mellan partikelstorlek och porstorlek mycket starkt, och porsystemet domineras därför ofta av en viss porstorlek. Huvudprincipen är dock att det i första hand är de minsta partikelstorlekarna som bestämmer porstorleken, eftersom finmaterialet fyller ut hålrummen mellan stora partiklar. Detta betyder att mängd och form av underkorn blir avgörande för porstorleken. Hur medelporstorleken förhåller sig till medelstenstorleken är ett komplext samband men kan som tumregel anges som 0,25 till 0,5 ggr medelstenstorlek [11], [26].

Gatans bärighet är normal en mycket viktig faktor. Låg bärighet påverkar drift och underhållsintervallen negativt och med ökande kostnader som följd. Hålrumsalter, permeabilitet och porstorlek påverkar konstruktionens bärighet, och det är därför viktigt att dessa egenskaper inte oreflekterat maximeras på bekostnad av bärigheten.

4. Krav på material till öppna konstruktioner

I BGG-konstruktioner används makadam i flera olika lager beroende på konstruktionstyp. Om dagvatten infiltrerar via dränerande markstensbeläggning används makadam till fogmaterial, sättmaterial, bärlager och förstärkningslager. Om Dagvatten infiltrerar via brunnar eller sidointag används makadam till förstärkningslager och eventuellt sättlager (om beläggningen består av marksten och bärlagret av Ag).

Följande avsnitt beskriver referensvärden på makadam till BGG-konstruktioner såsom föreslagits i projektet "Klimatsäkrade ytor för urbana miljöer" samt krav enligt AMA Anläggning 20. Materialkrav beskrivs i detalj i "Fördröjning av dagvatten med dränerande markstensbeläggning", Svensk Markbetong (2019).

4.1. Fog- och sättmaterial

I en dränerande markstensbeläggning används samma material till fog och sättlager. Fog- och sättmaterial ska bestå av korn från bergarter som inte vittrar eller nöts under belastning av trafik. Utöver de egenskaper en traditionell fog och fogmaterial har, ska fogen i en dränerande markstensbeläggning ha dränerande egenskaper som bibehålls över tid.

Fog- och sättmaterialet ska bestå av krossat obundet material i fraktionen 2/5 enligt Tabell 4-1 och Kornkurvan motsvarar AMA Anläggning DCG/1. Materialet ska ha en porositet större än 35 procent. Hydraulisk konduktivitet för 2/5 är normalt mycket hög. Referensvärdet för hydraulisk konduktivitet är $k = 1,0 \times 10^{-2}$ m/s [7]. Samtliga referensvärden för överbyggnadsmaterial sammanfattas i tabell 5.2.

Tabell 4-1 Kornstorleksfördelning för fog- och sättmaterial [1].

Kornstorleksfördelning för fog- och sättmaterial									
Sikt, mm	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	11,2
Max, viktsprocent	3	3	3	4	7	10	100	–	–
Min, viktsprocent	–	–	–	–	0	3	50	95	100

4.1.1. Obundet bär- och förstärkningslagermaterial

För dränerande markstensbeläggningar består bärlagret av krossat obundet material i fraktionen 4/32 Gc 80–20 enligt SS-EN 13242. Porositet ska vara större än 25 procent. Eftersom mängden finmaterial påverkar materialets dräneringsförmåga i stor utsträckning är maximal fillerhalt 2 procent. Referensvärdet för permeabilitetskoefficienten är $1,0 \times 10^{-2}$ m/s. Utöver dessa krav ska bärlagermaterial uppfylla kraven enligt Trafikverkets publikation TRVK10 – Obundna lager [21].

Kornstorleksfördelning ska deklarerarar SS-EN 13242 och ska ha en kurva enligt tabell AMA DCB.33/1. Observera att av bärighetsskäl är mängden material mellan 2 och 4 mm viktig. Riktvärdet för passerande mängd vid 4 mm sikt bör vara minimum 10 procent. Materialet ska inte vara tvättat. Referensvärden för obundet bärlagermaterial ges av Tabell 4-4 och kornstorleksfördelning ges av Tabell 4-1. Förstärkningslagermaterial för System I (obunden konstruktion) utgörs av obundet krossat material i fraktionen 4/90 Gc 80–20 enligt SS-EN 13242 och för System II och III av fraktionen 4/90 eller 16/90 [7].

Tabell 4-2 Kornstorleksfördelning för obundet bärlager av makadam [1]

Kornstorleksfördelning för obundet bärlager av makadam								
Sikt, mm	0,063	2	4	5,6	8	16	31,5	45
Max, %	2	5	20	31	43	68	99	–
Min, %	–	–	0	10	22	48	80	100

Förstärkningslagermaterial ska ha porositet större än 25 procent för fraktionen 4/90 och porositet större än 3 procent i fraktionen 16/90. Max fillerhalt är 2 procent. Hydraulisk konduktivitet för obundet förstärkningslagermaterial har referensvärdet $1,0 \times 10^{-3}$ m/s. Utöver dessa krav ska förstärkningslager uppfylla kraven enligt Trafikverkets publikation TRVK10 – Obundna lager [21].

Kornstorleksfördelning ska deklarerar SS-EN 13242 och ska ha en kurva enligt tabell AMA DCB.24/1. Observera att av bärighetsskäl är mängden material mellan 2 och 4 mm viktig. Riktvärdet för passerande mängd vid 4 mm sikt bör vara minimum 10 procent. Materialet ska inte vara tvättat.

Referensvärden för obundet förstärkningslagermaterial ges av Tabell 4-4 och kornstorleksfördelning ges av Tabell 4-3.

Tabell 4-3 Kornstorleksfördelning för obundet förstärkningslager av makadam 4/90 [1]

Kornstorleksfördelning för obundet förstärkningslager av makadam 4/90										
Sikt, mm	0,063	2	4	8	16	31,5	45	63	90	125
Max, %	2	5	20	35	54	78	88	93	98	–
Min, %	–	–	–	10	26	42	50	65	80	100

Tabell 4-4 Referensvärden för obundna överbyggnadsmaterial (efter Svensk Markbetong [7]).

Referensvärden för obundna överbyggnadsmaterial				
	Förstärkningslager		Bärlager	Fog- och sättmaterial
Sortering	4/90 ¹	16/90	4/32 ²	2/5
Referensvärde hydraulisk konduktivitet ³	1,0x10 ⁻³ m/s		1,0x10 ⁻² m/s	1,0x10 ⁻² m/s
Tillgänglig porvolym ³	>25 %	>35 %	>25 %	>35 %
Max fillerhalt	2 %		2 %	3 %
Max halt < 2 mm	5 %		5 %	10 %
Min halt < 4 mm ⁴	10 %	-	10 %	-
LA ⁵	6		6	< 20 ⁷
M _{DE} ⁸	6		6	< 15 ⁷
Bärighet vid statisk plattbelastning Ev2 ⁹	> 140 MPa			-

4.2. Bärlager av dränerande asfalt (ABD) eller asfaltgrus (AG)

För tungt belastade ytor kan BGG-system utföras med bitumenbunda bärlager. Om infiltration sker genom ytan (tex dränerande markstensbeläggning) används dränerande bitumenbundet material (till exempel ABD – Asfalt Betong Drän) eller dränerande cementstabiliserat material som bärlager. ABD har normalt porositet (hålrumshalt enligt Trafikverket) mellan 18–26 procent. ABD bör uppfylla kraven enligt Trafikverkets publikation ”Krav, Bitumenbundna lager” [9]. Slutlig specifikation för bitumenbundet dränerande bärlager bör arbetas fram gemensamt med lämplig asfaltstilverkare.

¹ Enligt SS-EN 13242 [29] och AMA Anläggning 20 [1] benämns sorteringen som 4/90 Gc 80–20.

² Enligt SS-EN 13242 [29] och AMA Anläggning 20 [1] benämns sorteringen som 4/32 Gc 80–20.

³ Med referensvärden avses värden fastställa i projektet ”Klimatsäkrade ytor för urbana miljöer”. Dessa värden ligger till grund för framtagna dimensionering och bör eftersträvas i kommunala projekt.

⁴ Observera att av bärighetsskäl är mängden material mellan 2 och 4 mm viktig. Riktvärdet för passerande mängd vid 4 mm sikt bör vara minimum 10 procent.

⁵ Motstånd mot fragmentering uppmätt med Los Angeles metoden enligt SS-EN 13242 [29].

⁶ Värden enligt Trafikverkets krav (TRVKB 10 Obundna lager [21], TDOK 2013:0530 Obundna lager för vägkonstruktioner [28]).

⁷ Rekommendationerna är en anpassning av belgiska nationella krav (Beeldens et al 2009 [24]), och kan frångås efter utredning.

⁸ Krav på nötningssegenskaper enligt SS-EN 13242 [29] uppmätt med micro-Deval metoden.

⁹ Uppmärksamhet bör fästas vid att det oftast krävs fler överfarter än vad AMA[1] anger för att säkerställa god komprimering.

ABD har normalt lägre stabilitet än AG och över tid kommer bärlagret deformeras med följden att dräneringsegenskaperna försämras. De försämrade dräneringsegenskaperna uppstår i första hand i hjulspår och beror på att hålrummet minskar när materialet deformeras. Inom projektet ”Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor” uppmättes 50 procent minskning i dränerande förmåga i hjulspår efter en hel livslängds belastning [22].

Mellan hjulspåren försämrades dräneringsförmågan endast i mindre utsträckning. Med tiden kommer viss igensättning, på grund av smuts och partiklar, av dränerande bärlager att ske, vilket försämrar dräneringsegenskaperna. Igensättningen av bitumenbundna dränerande bärlager går dock betydligt långsammare jämfört med motsvarande slitlager. Detta beror på att slitlagret är mera exponerat för smuts och partiklar.

Dimensionerande värde på infiltrationsförmåga måste vara kompenserat för igensättning och deformationer som sker under konstruktionens livslängd. Dimensionerande värde för infiltrationsförmåga rekommenderas till max 25 procent av ursprungligt värde. Dimensionerande värde på infiltrationsförmåga ska överskrida behovet att infiltrera dimensionerande nederbörd (t ex 20 eller 30 mm/h beroende på vald varaktighet och återkomsttid). Utomlands används ofta dränerande cementstabiliserat bärlager, med hålrumshalt upp till 35 procent, på grund av sin mycket höga bärighet [15]. I Sverige har endast begränsad erfarenhet upparbetats av dränerande cementstabiliserat grus. Detta omfattas därför inte av denna handbok.

För BGG-konstruktioner där ingen infiltration sker igenom beläggningens yta, kan det bitumenbundna bärlagret utföras med asfaltgrus (Ag). Asfaltgrus ska uppfylla kraven enligt Trafikverkets publikation ”Krav, Bitumenbundna lager TDOK 2013:0529 ” [9] . Ytterligare materialkrav beskrivs i detalj i ”Fördröjning av dagvatten med dränerande markstensbeläggning”[7].

4.3. Dränerande markstensbeläggning

Dränerande markstensbeläggning kan mycket förenklat beskrivas som en halvelastisk beläggning eftersom den är både styv och elastisk. Till skillnad från asfalt består markstensbeläggningen av styva enheter som är förbundna med varandra av elastiska fogar av krossat obundet material. Beläggningen har lång livslängd, precis som betong i allmänhet. Förutom att fungera som lastspridande material, säkerställer även beläggningens fog att dagvatten kan dränera ned till underliggande lager. Vatten dräneras antingen genom fogen eller via perkolationsöppningar. Större fogarea ger initialt något högre infiltrationskapacitet men ger samtidigt lägre lastspridande förmåga. För trafikbelastade ytor bör tillgänglig fogarea vara minst 8–10 procent. För produkter på svenska marknaden ligger tillgänglig fogarea för infiltration på 13 %. För obelastade ytor kan tillgänglig fogarea för infiltration ökas till ca 20 procent vid behov. Den absolut viktigaste faktorn för beläggningens infiltrationskapacitet är dock fogmaterialets infiltrationsförmåga

Enligt britteniska byggnadsregler sätts minimum infiltrationskapacitet för ny beläggning till 2 500 mm/h [4], [20]. Jämfört med nederbördsintensiteter som förekommer i Sverige är detta ett mycket högt värde som även kompenserar för avtagande infiltrationsförmåga över tid. De riktlinjer för kornstorleksfördelning och permeabilitet som ges i avsnitt 4.1 resulterar dock normalt till en infiltrationskapacitet för beläggningen som väl överstiger 2500 mm/h. Inom projektet ”Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor” uppmättes beläggningarnas infiltrationskapacitet till mellan 10 000 – 15 000 mm/h[22]. Även vid mycket kraftig igensättning och bristande underhåll kommer fogarnas dräneringsförmåga väl motsvara dimensionerande nederbördsintensitet

Dränerande betongmarksten tillverkas enligt SS-EN 1338 [17] och finns i ett flertal format. Slutligt val av dränerande betongmarksten bör göras i samverkan med tillverkaren.

5. BGG-konstruktioners bärighet

Begreppet "bärighet" är ett mycket använt begrepp inom vägtekniken. "Bärighet" är ett vitt begrepp och beskriver inte någon enstaka teknisk funktion eller egenskap hos ett material eller konstruktion. Snarare är begreppet "bärighet" en generell beskrivning av en allmänt förväntad tillståndsutveckling. Exempel på tillståndsutveckling är spårdjup som ökar med tiden, deformationer som ökar till antal och djup med tiden samt sprickor i asfaltbeläggningar som ökar till antal och storlek med tiden. Enligt Trafikverket definieras bärighet enligt följande: "Med Bärighet avses högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor och deformationer." Men, utan koppling till specifikt tillståndsmått (tex spårdjup), kravnivå (tex max spårdjup) och mätmetodik (tex rätskiva) är termen bärighet ett administrativt begrepp.

Fallviktsmätningar, som redovisas senare i rapporten, är ett exempel på hur bärighet kan kopplas till en konstruktions och även materialens tekniska funktion.

Från ett tekniskt perspektiv kan bärighet sin enklaste form förstås som ett materials förmåga att via kontakt mellan stenarna (i stenskelettet) sprida belastning från fordon på ytan genom överbyggnaden och ned till terrassen. Om detta sker utan att någon permanent deformation uppstår (i materialet själv, terrassen eller överbyggnaden som helhet) kan materialet/överbyggnaden sägas ha "hög bärighet". Förmågan till detta beror inte enbart på hur effektivt stenskelettet kan sprida belastningen men även på distansen (tjockleken) belastningen ska förflyttas. Överbyggnaden sprider belastningen som en solfjäder från ytan. Belastningen minskar successivt innan den når terrassen. Ju tjockare överbyggnad desto mindre belastning på terrassen.

Många faktorer påverkar en vägkonstruktions bärighet och förväntad tillståndsutveckling, tex materialegenskaper (tex styvhet), utförande (tex packningsarbete), väder och klimat (tex nederbörd, tjäle och tjällossning) samt drift och underhåll (tex frekvens). Det som skiljer BGG-konstruktioner från traditionella konstruktioner är i princip två faktorer; makadam som förstärkningslagermaterial och frekvent närvaro av vatten.

Traditionellt brukar närvaro av vatten antas reducera bärigheten och därmed försämra tillståndsutvecklingen. Om ett vattenfyllt material belastas finns risk att vattentrycket ökar och att stenpartiklarna därmed tappar kontakten med varandra. Vattentrycket ökar om vattnet inte har någonstans att ta vägen. Bärighet (eller mera korrekt styvhet) i ett material uppstår genom att yttre belastning överförs via stenkontakt (stenskelettet). Om stenpartiklarna tappar kontakten (pga högt vattentryck) sjunker styvheten (och bärigheten). Detta är i allra högsta grad en risk för traditionellt använda förstärkningslagermaterial av samkross 0/90. Samkross har relativt låg hålrums halt och låg permeabilitet. Den låga hålrums halten och permeabiliteten medför att redan vid ett lågt vatteninnehåll kommer vattentrycket snabbt att öka (när materialet belastas) och styvheten (och bärigheten) sjunker snabbt. I detta fall kommer permanenta deformationer uppstå i materialet. Dessa kommer med tiden fortplantar sig uppöver i konstruktionen och manifestera sig som spår eller andra deformationer på ytan.

Till skillnad från traditionella konstruktioner har BGG-konstruktioner förstärkningslagret av makadam. Makadam har avsevärt högre hålrums halt och mycket högre permeabilitet jämfört med samkross. Den höga hålrums halten och permeabiliteten medför att vattnet har utrymme och möjlighet att förflytta sig när konstruktionen belastas. Detta gör att vattentrycket inte ökar och att stenkontakt och styvhet upprätthålls i materialet.

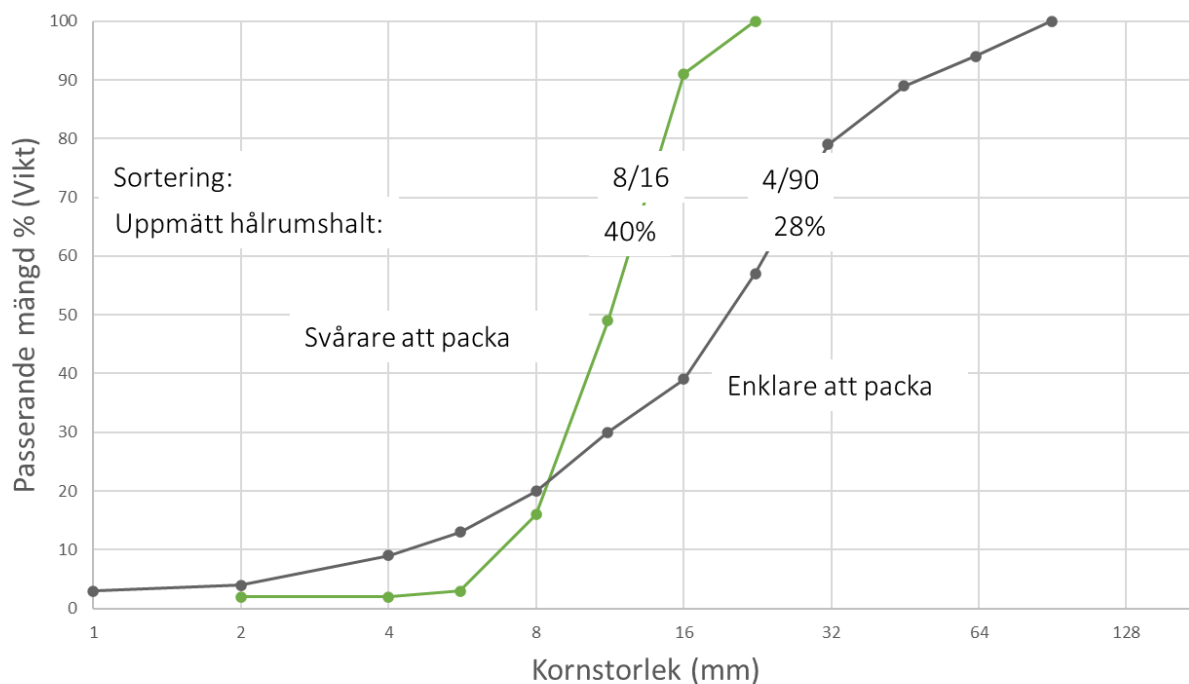
Däremot upplevs makadam som mera svårpackat än samkross och ett lyckat packningsresultat är viktigt för bärighet och tillståndsutveckling. Huvudsyftet med packningen är att öka materialets densitet och därigenom öka kontakten mellan stenarna. I samkross finns en stor mängd fina partiklar som fungerar som ett smörjmedel som hjälper till att öka densiteten under packningen. Ett material

med nära vertikal siktkurva (8/16, 16/32, 32/64, se Figur 5-2) är därför något mera svårpackat än material med en mera lutande siktkurva (4/90).



Figur 5-1 Att packningen utförs korrekt är av yttersta vikt för ett gott resultat (Foto Benders AB).

En viktig praktisk lärdom från tidigare VINNOVA projekt var att när makadam upplevdes som färdigpackade (även för erfarna vältförare), kunde packningsmätningar med statisk plattbelastning samtidigt visa att så inte var fallet. För att säkerställa ett bra resultat med makadam rekommenderas att alltid använda statisk plattbelastning för packningskontroll.



Figur 5-2 Kornkurvan påverkar materialets packningsegenskaper (Illustration Erik Simonsen).

Sammanfattningsvis påverkar inte närvaron av vatten ett öppet förstärkningslagers bärighet. Däremot bör man alltid betänka att närvaro av vatten över tid ökar risken för att bärigheten kan påverkas något. I VINNOVA projektet "Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor" uppmättes effekten av vattenfyllt förstärkningslager på bärigheten. Effekten kan exemplifieras på en bussgata i trafikklass 2. Trafikklass 2 motsvarar 1 buss per tredje minut (trafik 12t/dygn), varje dag under 20 år. Om förstärkningslagret antas vara vattenfyllt under 1 dygn per vecka under 20 år ger detta endast 1 mm tillskott till totala spårjupet! Tillskottet till spårutvecklingen, orsakat av närvaron av vatten, kunde estimeras till mindre än 5 procent av totala spårbildningen under 20 år.

Packningsegenskaperna hos makadam bör också beaktas, varför man inte i onödan ska välja material utifrån maximal hålrums halt. För att minimera riskerna med för låg packningsgrad vid utförande bör behovet av hålrums halt (krav på magasinering) och porstorlek (rotutrymme) noggrant utredas, varefter ett material med så låg hålrums halt som möjligt väljs. Så länge permeabiliteten är tillräckligt hög kan den lägre magasineringsskapaciteten i en makadam med något lägre hålrums halt kompenseras med något tjockare lager.

Som exempel är 20 mm nederbörd ett vanligt fördröjningskrav i svenska kommuner. 20 mm nederbörd kan magasineras i ett 50 mm tjockt förstärkningslager med hålrums halt 40 %. Om hålrums halten är 30 % behövs 66 mm förstärkningslager. Tjocklekarna ska sedan jämföras med behovet av förstärkningslager med avseende på bärighet. För trafikklass 1a är kravet på förstärkningslagertjocklek minimum 200 mm på ett terrassmaterial av lera. I detta fall ger det därför ingen extra säkerhet att maximera hålrums halten eftersom kravet på magasineringsskapacitet ändå avsevärt kommer överstigas. Genom att välja ett material med något lägre hålrums halt och flackare kornkurva kan packningsarbetet underlättas och risken för deformationer i materialet reduceras.

6. Dimensionering av BGG-konstruktioner kommunperspektivet

BGG-konstruktioner har i princip tre huvudsakliga tekniska funktioner:

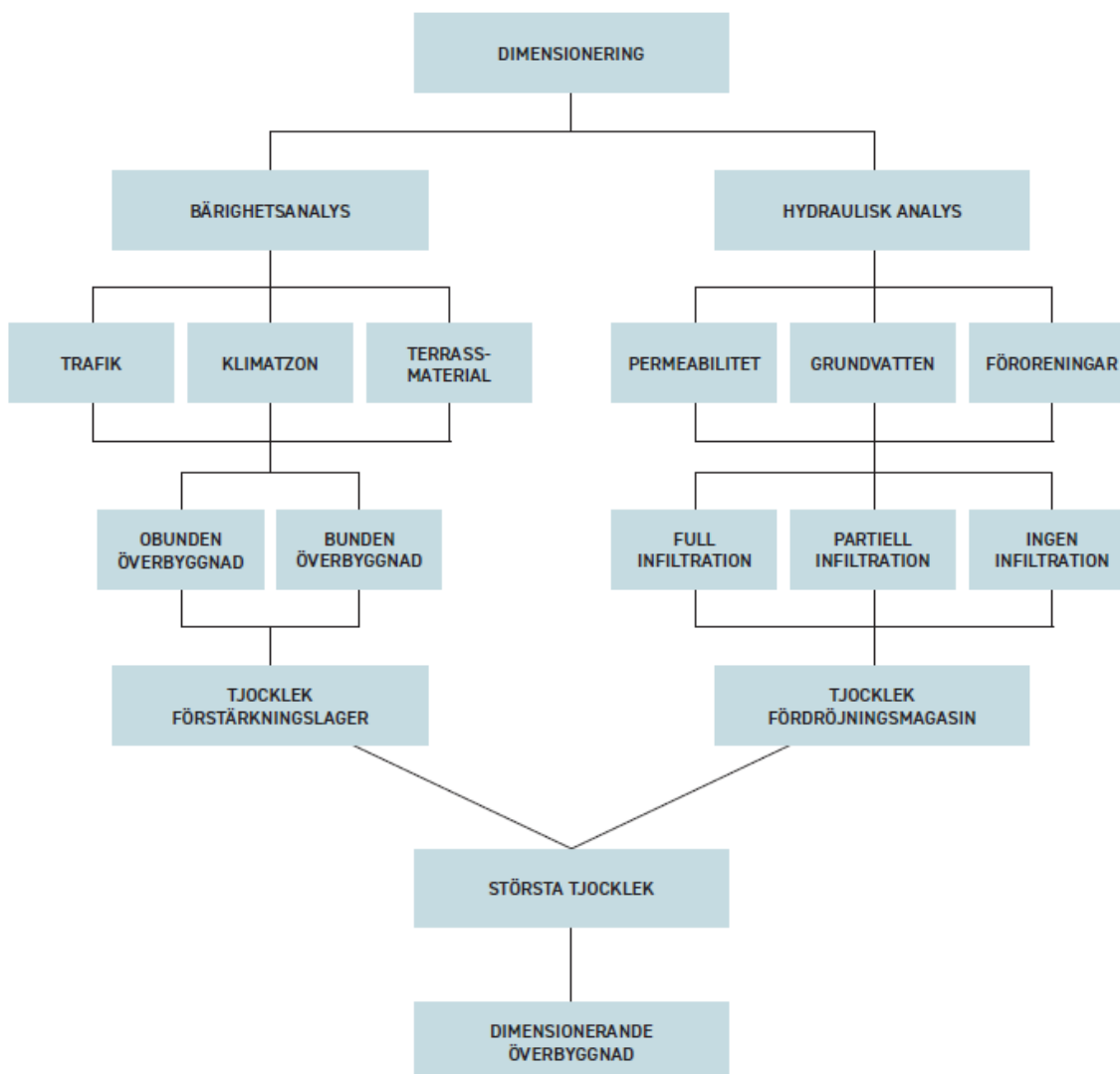
1. Omhändertagande, fördröjning och exfiltrering (avtappning) av nederbörd
2. Ge tillräcklig bärighet för aktuell trafikklass
3. Tillgodose goda betingelser för växtlighet genom bland annat utrymme för tillväxt och gasutbyte

För att fastställa konstruktionens slutliga uppbyggnad krävs två separata beräkningsprocedurer; bärighets- och hydraulisk beräkning. Bärighetsberäkningen syftar till att ta fram nödvändig förstärkningslagertjocklek så att terrassen skyddas från trafikbelastningen. Genom att öka förstärkningslagrets tjocklek minskar belastningen på terrassen. Detta medför att risken minskar för sättningar och deformationer och överbyggnaden kan uppfylla avsedd funktion. Samtidigt har för tjock överbyggnad (dvs överdimensionerad) negativa miljökonsekvenser. Rätt dimensionering ger att du inte använder mer material än nödvändigt, vilket minskar behovet av transporter och produktion. Dimensioneringen påverkar också hur stor mängd schaktmassor du behöver flytta på. Som exempel ökar transportbehovet i snitt med 41 % om du oflekterat väljer trafikklass 3 i stället för trafikklass 2. I enskilda fall ökar transportbehovet med hela 86 % (Svensk Markbetong 2022).

Hydraulisk dimensionering syftar till att beräkna nödvändig storlek på magasin för omhändertagande och fördröjning av infiltrerande dagvatten. Eftersom magasinets yta normalt är känt är det även i detta fall magasinets tjocklek, d v s förstärkningslagret, som ska dimensioneras. Största tjocklek från respektive dimensionering blir slutlig dimensionerande tjocklek. Dimensioneringsprocedurerna följer flödesdiagrammet i Figur 3 1.

För detaljerad information om dimensionering av bärighet och magasineringskapacitet se t.ex. ”Fördröjning av dagvatten med dränerande markstensbeläggning”, Svensk Markbetong (2019), [7].

För kommunala applikationer innebär dimensioneringsprocessen långt fler moment än att etablera korrekt förstärkningslagertjocklek med avseende på bärighet och magasineringskapacitet. De olika stegen i processen kan sammanfattas enligt nedan. Det är viktigt att notera att acceptabel tillståndsutveckling i beläggning och konstruktion förutsätter efterlevnad i samtliga moment. Nedan beskrivs dessa nödvändiga moment.



Figur 6-1 Flödesschema för bärlighets- och hydraulisk dimensionering av dränerande markstenskonstruktioner [7].

6.1. Bärighetsdimensionering – Klimatpåverkan

Genom korrekt dimensionering av förstärkningslagrets tjocklek kan överbyggnaden skyddas mot tjälpåverkan (tjällyftning och tjällossning). Tjällyftningar ökar risken för ojämna deformationer och sprickbildning på ytan. Tjällossning kan förorsaka uppmjukning av terrassen med deformationer till följd. Deformationerna fortplantar sig sedan succesivt uppåt i överbyggnaden och manifesterar sig på ytan som sättningar och spårbildning. Dimensioneringen sker oftast via s.k. tabelldimensionering, se vidare avsnitt 6.8

6.2. Bärighetsdimensionering – trafikbelastning

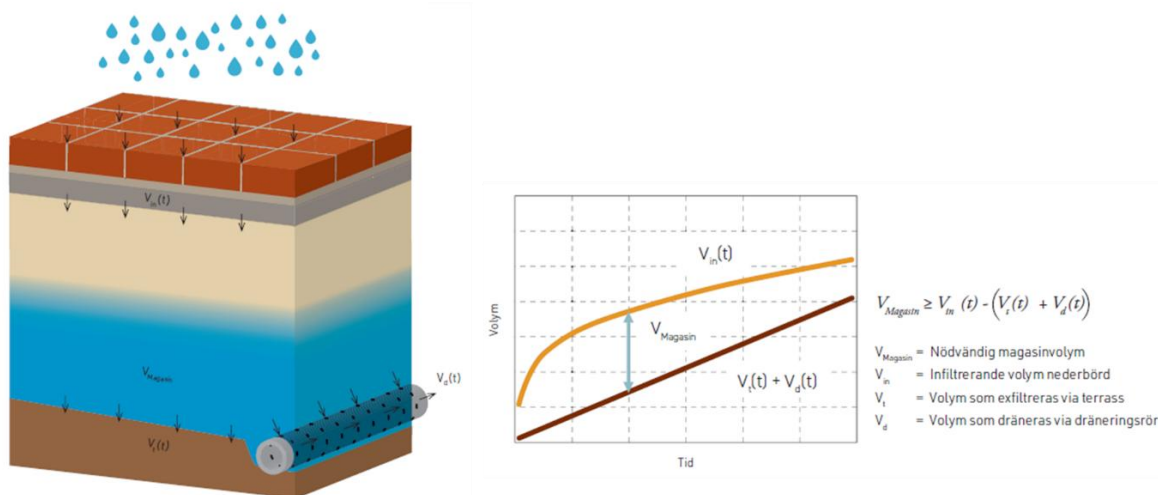
Överbyggnaden dimensioneras med hänsyn till den förväntade trafiklasten som kommer belasta konstruktionen under dess livslängd. Olika vägar trafikeras av olika mycket trafik. För att kunna konstruera ändamålsenliga vägar behöver vi dimensionera överbyggnaden så att terrassen klarar av belastningen. En konstruktion som är för klen kommer att gå sönder, och en konstruktion som är för kraftig genererar onödiga kostnader, transporter och klimatpåverkan. Totala trafiklasten, uttryckt genom aktuell trafikklass, dimensionerar förstärkningslagrets tjocklek. Dimensioneringen sker oftast via sk tabelldimensionering. För en fullständig beskrivning av dimensioneringsprocessen för öppna

konstruktioner hänvisas till "Fördröjning av dagvatten med dränerande markstensbeläggning", Svensk Markbetong (2019), [7].

6.3. Hydraulisk dimensionering

BGG-system är utvecklade för att klara att vatten under korta perioder fördröjs i överbyggnaden utan att konstruktionen tar skada om den belastas med trafik. Det uppnås delvis genom att utforma systemet så att det är tömt inom 24 timmar efter dimensionerande regn, med undantag för eventuell bevattningszon [10].

Figur 6-2 illustrerar nödvändigt magasin för fördröjning av dagvatten. Magasinsvolymen måste vara större än infiltrerande mängd vatten minus vatten som exfiltreras (avtappas) till terrass samt dräneras via dräneringsrör. Nederbörd är oregelbunden och varierar stort över tiden. Detta gör att beräkning av flödet (från direkt nederbörd och tillrinnande ytor) som är i behov av fördröjning blir en balansräkning mellan många faktorer som varierar i tiden. En fullständig analys blir då normalt för komplex för att kunna analyseras med en handberäkningsmetod. Lämplig dimensioneringsmetodik beskrivs i mera detalj i t. ex. Svenskt Vatten P104 och P110, Levande Stadsrum (2019) och Svensk Markbetong (2019), [2], [3] [5], [13], [7], [10].



Figur 6-2 Illustration av nödvändig magasinvolym för fördröjning av infiltrerande vatten [7].

6.4. Konstruktionstekniska lösningar

Dimensionering med avseende på trafikbelastning tar bara hänsyn till vertikala laster från fordonens axelvikt. Men vid bussgator, hållplatser och farthinder påverkas vägkonstruktionen av dynamiska krafter som uppstår när fordon bromsar, svänger eller accelererar.

För att de krafterna som uppstår inte ska ge skador i vägbanan behövs ofta tekniska lösningar som tål den sortens påfrestningar. Denna typ av tekniska lösningar är ofta platsspecifika och handlar t.ex. om att förhindra att stenarna i beläggningen hamnar ur position i förhållande till varandra. Exempel på denna typ av tekniska lösningar kan vara; inspanning, lutningar, dränering och ytliga vattenvägar samt höjdsättning och anslutning mot fast kant och begränsning m. fl. Dimensioneringen är helt och hållet beroende på platsspecifika förhållanden och måste hanteras från fall till fall. Stöd i typritningar återfinns i tex AMA Anläggning20 ([1]) och Beläggning med plattor och marksten av betong (2019) ([7]).



Figur 6-3 Exempel från bussgata utan inspänning. Förlust av fogmaterial har inte åtgärdats och fogförskjutning uppstår (Foto Erik Simonsen).

6.5. Utförande

Val av material, packningsförfarande samt kontroll och besiktning är mycket viktiga moment för att säkerställa att konstruktionens dimensionerande livslängd uppnås. Viktiga moment vid utförande kan sammanfattas enligt följande:

- Använd utbildad personal.
- Använd förbesiktningar under projektets gång. Säkerställer det som sedan göms under mark och klarlägger vilken kvalitetsnivå som gäller medan det fortfarande är lätt att åtgärda.
- Hög prioritet på arbetsplatsplanering.
- Risken att förväxla olika typer av material (till exempel olika fraktioner krossmaterial) måste förhindras genom en väl planerad arbetsplats och turordning för olika arbetsmoment.
- Alla leveranser till arbetsplatsen måste kontrolleras noga, märkas tydligt och lagras på arbetsplatsen utan risk för kontamination.
- Använd fysiska hinder som motverkar att smuts och annat material vandrar in på den dränerande ytan från intilliggande byggarbeten
- Undvik att packa terrassen om inte uttryckligen noterat i projektörens anvisningar (gäller om terrassen ska infiltrera dagvatten).
- Undvik hjulburna arbetsredskap, använd helst fordon med larvfötter.
- Kontrollera med statisk plattbelastning att bär- och förstärkningslager är tillräckligt packat.
- Kontrollera samtliga att lager har rätt nivå och att eventuella ojämnheter inte överskrider givna toleranser i AMA Anläggning.
- Var särskilt noggrann med packningen kring brunnar och andra anslutningar.
- Använd inte sättmaterial för utjämning av höjdskillnader i bärlagret.

- Använd aldrig stenmjöl som sättlager!
- Kontrollera att markstenar läggs med rätt fogbredd (2 - 5 mm), inte kant i kant.
- Var noga med att stenarna läggs i nivå. Nivåskillnader ökar belastningen och risken för förlust av fogmaterial. Maskinläggning är att föredra!
- Använd torrt fogmaterial, efterfoga upprepade gånger.
- Om möjligt låt överblivet fogmaterial ligga kvar på ytan.
- Säkerställ och fotodokumentera egenkontroll.



Figur 6-4 Använd helst maskiner med larvfötter. Här utläggning av öppet bärlager över öppet förstärkningslager vid Jem & Fix, Vara (Foto: Benders AB).

6.6. Drift och underhåll

Drift och Underhåll (DoU) är mycket viktiga moment för att säkerställa att konstruktionens dimensionerande livslängd uppnås. Viktiga moment vid DoU kan sammanfattas enligt [7]:

- Kontrollera att Drift och underhållsplanen innehåller alla arbetsmoment, med vilken frekvens de ska utföras och vilken utrustning och material som ska användas.
- Utbilda personal om hur de olika arbetsmomenten hör ihop.
- Använd rätt utrustning.
- Ojämnheter och sättningar ska åtgärdas omgående.
- Kontroll av ytan ska ske med bestämda tidsintervall.
- Komplettering med fogmaterial enligt skötselplan, samt vid behov. Använd torrt fogmaterial.
- Halkbekämpa med samma material som fog/sättningsmaterial

- Halkbekämpning med salt bör begränsas. Tänk på att salt infiltreras tillsammans med dagvattnet och närhet till eventuella dagvattentäktar samt påverkan på växtlighet måste beaktas
- Sopning kan ske som normalt
- Vakuumsugning bör undvikas (gäller dränerande beläggningar)
- Spolning med högtryck bör undvikas (gäller dränerande beläggningar)
- Dokumentera ingående arbetsmoment noggrant.
- Använd skötselbesiktning
- Skicka dokumentation av skötseln till beställaren.

För dränerande beläggningar är en av de viktigaste drift- och underhållsåtgärderna att säkerställa beläggningens infiltrerande egenskaper över tid. Det är därför viktigt att beläggningen kontrolleras vid tidsbestämda intervall. Hur ofta ytan bör kontrolleras beror på trafiksituationen och närhet till exempelvis grönområden.

En snabb, enkel och subjektiv test som kan göras mycket frekvent är att hålla några liter vatten på ytan och okulärt bedöma utbredningen och infiltrationen. Särskilt bör övergången mellan omgivande traditionella beläggningar och dränerande beläggning kontrolleras eftersom detta är områden som oftast först tenderar att sättas igen. En annan enkel inspektion är att bedöma mängden vattenbildningar (pölar) under eller omedelbart efter en relativt intensiv nederbörd. Bildas vattenpölar på mera än ca 20 procent av ytan bör ytan kontrolleras mera noggrant med jämförande testmetoder som t ex dubbelringsinfiltrimeter, se vidare avsnitt 9.

Om stående vatten bildar pölar på ytan eller om infiltrationsförmågan på annat sätt är reducerad, bör ytan vakuumsopas för att få bort sediment som sätter igen fogen. Enbart sopning är normalt inte tillräckligt och därför bör sugande sopmaskiner användas för att säkerställa att problemen åtgärdas. Hela eller delar av fogmaterialet måste normalt sugas upp, beroende på graden av igensättning. Igensättningsdjupen kan enkelt kontrolleras genom att gröpa ur fogen med en skruvmejsel ner till opåverkat djup. Sugdjupet ställs in och anpassas till igensättningsdjupet. Fogen ska återfyllas med nytt och rent fogmaterial (2/5). Efter åtgärd bör ytan testas för att säkerställa att infiltrationsförmågan har förbättrats till åtminstone 50 procent av den ursprungliga. Orsaken till igensättning bör därefter utredas och åtgärdas.

6.7. Uppföljning

För att samhället ska kunna nå ett mer hållbart samhällsbyggande, krävs flera strukturella skiften som kräver att vi ställer om vårt sätt att bygga vår infrastruktur. Sådana skiften innebär en transformativ förändring som omfattar teknisk innovation, förändringar av beteenden, kultur och normer samt förändring hos våra styrande institutioner [6]. Att arbeta för denna omställning kräver kontinuerliga och integrerade processer för innovation, kunskapsuppbyggnad och uppföljning.

Dimensionering av vägkonstruktioner är i mångt och mycket en erfarenhetsbaserad, process. Delar av processen bygger på analytiska modeller, andra helt och håller på empiri. Utan uppföljning av byggda konstruktioner kommer samtliga av alla antaganden, nödvändiga både i analytiska och empiriska modeller och metoder, vara högst osäkra. Uppföljning ger viktig kunskap om vilka antaganden som förorsakar vilken effekt och hur olika antaganden samverkar/motverkar varandra. Utan uppföljning blir det även svårt att korrigera dimensioneringsprocessen inför nästa objekt. Uppföljning ger inte bara information om hur väl antaganden kring aktuellt projekt har fungerat. Med korrekt underlag kan också lärdomar extrapoleras att gälla generellt.

Det blötare klimatet ställer nya krav på vår infrastruktur och våra tätorter, som måste klara att ta hand om större mängder nederbörd än tidigare. I detta sammanhang är det av yttersta vikt att nya innovationer som omsätts i praktiken även följs upp på både kort och lång sikt. Annars kommer översvämningarna fortsätta att öka, vilket kommer kosta samhället miljarder.

6.8. Tabelldimensionering – bärighet

Av samtliga metoder för dimensionering av vägkonstruktioner är tabelldimensionering den enklaste. Tabelldimensionering bygger på ett stort antal beräknade exempel för olika typer av terrassmaterial, klimatpåverkan, material i konstruktionen och trafikbelastning. Exempelen är sedan tabellerade där färdig konstruktion kan avläsas som funktion av ett antal påverkande faktorer. Exempelen är i regel beräknade med komplexa analytiska metoder. Projektörens uppgift blir då att välja det exempel från tabellen som närmast motsvarar den situation som gäller för aktuellt projekt.

En korrekt dimensionering bygger på att du vet tre saker:

- Aktuell klimatzon
- Materialtyp i terrassen
- Trafikklass för ytan

Det är ganska enkelt att ta redan på de två första faktorerna som påverkar en korrekt dimensionering av vägkonstruktioner dvs. aktuell klimatzon och materialtyp i terrassen. Däremot upplever många att det är svårt att räkna ut trafikklassen. Nedan beskrivs hur man ska hantera dessa faktorer.

6.8.1. Trafikklass

Det är vanligt att uppskatta trafikklassen, och att sedan ta i till lite extra för att vara på den säkra sidan. Resultatet är att en godtycklig säkerhetsfaktor bakas in i beräkningen som sedan blir osynlig i resten av projekteringen. Säkerhetsfaktorer som inte syns kan heller inte beaktas.

Att välja högre trafikklass än nödvändigt kan också få olika negativa effekter beroende på t ex materialtyp i terrassen. Dessutom är en kraftigare konstruktion negativt för ekonomin och miljön, eftersom det alternativet kostar mer och har en högre klimatpåverkan. Många tror också att man kan välja en högre trafikklass för att kompensera för ett bristande utförande eller framtida skötsel, men det stämmer inte.

Olika vägar trafikeras av olika mycket trafik. För att kunna konstruera ändamålsenliga vägar behöver vi dimensionera överbyggnaden så att terrassen klarar av belastningen. En konstruktion som är för liten kommer att gå sönder, och en konstruktion som är för kraftig genererar onödiga kostnader, transporter och klimatpåverkan. För att systematiskt avgöra hur stor belastning en väg ska dimensioneras för använder vi trafikklasser. En trafikklass är en uppskattning av hur mycket trafiken sammantaget kommer belasta vägen under dess tekniska livslängd, vilket normalt är 20 år.

För att bestämma vilken trafikklass en vägsträcka har görs en trafikklassanalys, för att uppskatta hur många tunga och lätta fordon som trafikerar vägsträckan. Sedan räknas trafikbelastningen om till antal standardaxlar. Standardaxeln är en fiktiv referensaxel som alla tänkbara verkliga axellaster konverteras till. Genom att de verkliga trafikspektra konverteras till motsvarande antal standardaxlar kan olika trafikfördelningar jämföras. När man vet hur många standardaxlar en väg ska belastas med, så kan man se i Figur 6-5 för att avgöra hur vägen kan dimensioneras och konstrueras.

Om man bedömer att trafikbelastning blir drygt 50 000 standardaxlar (trafikklass 1a) dimensioneras ytan för att klara upp till max 250 000 standardaxlar. De högre trafikklasserna ökar spannet mellan övre och nedre gränsen. Det beror på att bedömningen av förväntat antal standardaxlar på framtida objekt är mer osäker. Tabellen ger också information om i vilken klass marksten är lämpligt att lägga (både traditionella och dränerande konstruktioner).

Enklaste sättet att beräkna korrekt trafikklass är att använda några av Svensk Markbetongs dimensioneringsprogram (www.svenskmarkbetong.se).

Tillåtet antal standardaxlar ⁽¹⁾	Trafikklass	Traditionella konstruktioner			Dränerande konstruktioner	
		Plattor	Marksten halvförband	Marksten, låssten eller fiskbensförband	System I	System II och System III
0	G					
0	GC					
< 50 000	0					
50 000 – 250 000	1a					
250 000 – 500 000	1b					
500 000 – 1 000 000	2					
1 000 000 – 2 500 000	3					
2 500 000 – 5 000 000	4					
>5 000 000	≥ 5 ⁽²⁾			Särskild utredning krävs		

Lämpligt	Enl leverantörs anvisning	Ej lämpligt
----------	---------------------------	-------------

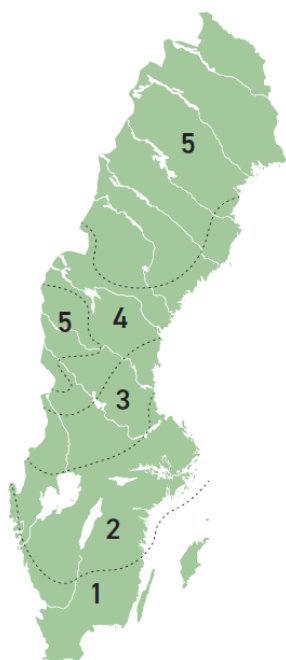
(1) Per körfält

(2) Särskild utredning och beräkning krävs för markstensbeläggningar i trafikklass 5 och högre. Se vidare [14] (Markstensbeläggningar för Industrier (2006)).

Figur 6-5 Indelning i trafikklasser.

6.8.2. Klimatzon

Ett objekts klimatzon hittar du på en klimatzonskarta (Figur 6-6). I varje klimatzon är de materialtekniska egenskaperna med avseende på tjäle och tjällossning lika. För en översiktlig dimensionering behöver du oftast inte ha koll på dessa egenskaper eftersom de är inbakade i de flesta dimensioneringssystemen. Klimatzoner kan förändras över tid och man bör ta det i beaktande. Enligt rådande forskning (IPCC 2023) förväntas klimatet att bli varmare och förskjuta klimatzonerna norr över. Det rekommenderas att man tar med detta i sin dimensionering.



Figur 6-6 Indelning av Sverige i klimatzoner [1] [7].

6.8.3. Materialtyp i terrassen

Olika materialtyper (lera, silt, morän o s v) har olika tekniska egenskaper. Att reda ut rätt materialtyp i terrassen är viktigt och kan göras på två sätt: Antingen beställs en jordartskarta från SGU (Sveriges Geologiska Undersökning), eller så gör man en noggrannare undersökning av de geologiska förutsättningarna på platsen. Fördelen är att den ger exakta uppgifter om materialen i hela väglinjen.

När aktuell klimatzon, materialtyp i terrassen och trafikklass för ytan är känt kan konstruktionen ”beräknas”. Figur 6-7 illustrerar hur tabelldimensioneringen kan göras[7].

Känt:

Trafikklass = 2

Materialtyp i terrass = 3

Förstärkningslager = 290

Bärlager = 80

Sättningslager = 30

Sten = 80

Total ÖB-tjocklek = 480 mm

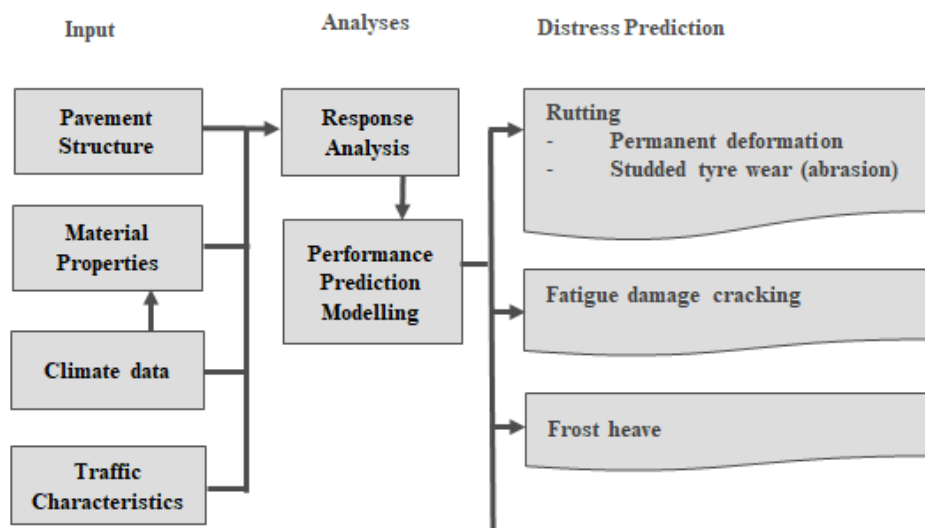
Klimatzon 1-5, krossat material i förstärkningslagret									
Trafik	Tillåtet antal standardaxlar	0	0	< 50 000	50 000 - 250 000	250 000 - 500 000	500 000 - 1 000 000	1 000 000 - 2 500 000	2 500 000 - 5 000 000
	Trafikklass	G	GC	0	1a	1b	2	3	4
Överbbyggnad	Tjocklek (mm)								
	Marksten ⁽¹⁾	40	50	60	80	80	80	80	80
	Sättningslager	30	30	30	30	30	30	30	30
	Obundet bärlager	Hela ÖB	80	80	80	80	80	80	80
	Förstärkningslagertjocklek (h ₁) på terrass av materialtyp 1-5 ⁽²⁾	1	0	0	70	70	190	190	250
		2	0	70	110	110	150	290	350
		3	0	70	120	150	240	290	400
		4	100	70	120	160	270	330	470
		5	140	170	220	270	400	580	680

Figur 6-7 Exempel på tabelldimensionering (för traditionella markstenskonstruktioner).

6.9. ERAPave – ett dimensioneringsverktyg

Ett komplement till dimensioneringstabeller är att modellera vägens egenskaper och livslängd. Fördelen är att man kan optimera materialåtgång och jämföra olika typer av konstruktionslösningar under olika typer av klimatscenarier så man får de egenskaper man efterfrågar. ERAPave (Elastic Response Analysis of PAVements – Performance Prediction)) är ett dimensioneringsverktyg som utvecklats vid Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI). Programmet använder mekanistisk-empirisk analysmodell för att prediktera spårdjup, utmattningssprickor och dubbdäcksslitage för vägkonstruktioner med kända materialegenskaper. Det går även att förutse tjällyft och stabilitet under stora statiska laster. Programmet är främst framtaget för flexibla vägkonstruktioner med asfaltsbeläggning men även semi-flexibla med markstensbeläggningar har gett resultat som går att validera under kontrollerade försök ([14]).

En materialdatabas med vanligt förekommande vägbyggnadsmaterial finns tillgänglig och är under ständig utveckling. Detta gör att dimensioneringsverktyget kommer förbättras och bli än mer användbart när fler material tillkommer. I klimatdata ingår temperatur och fuktighet vilket gör det möjligt att förutse vägkonstruktionens egenskaper och livslängd baserat på både trafikmängd och årstidsvariationer. Det är också möjligt att se effekter av olika klimatscenarier som tex om vägkonstruktionen blir utsatt för extrema temperaturer och fuktighet under olika perioder.



Figur 6-8 Beräkningsflöde i ERAPave.

6.9.1. Hur använder man ERAPave?

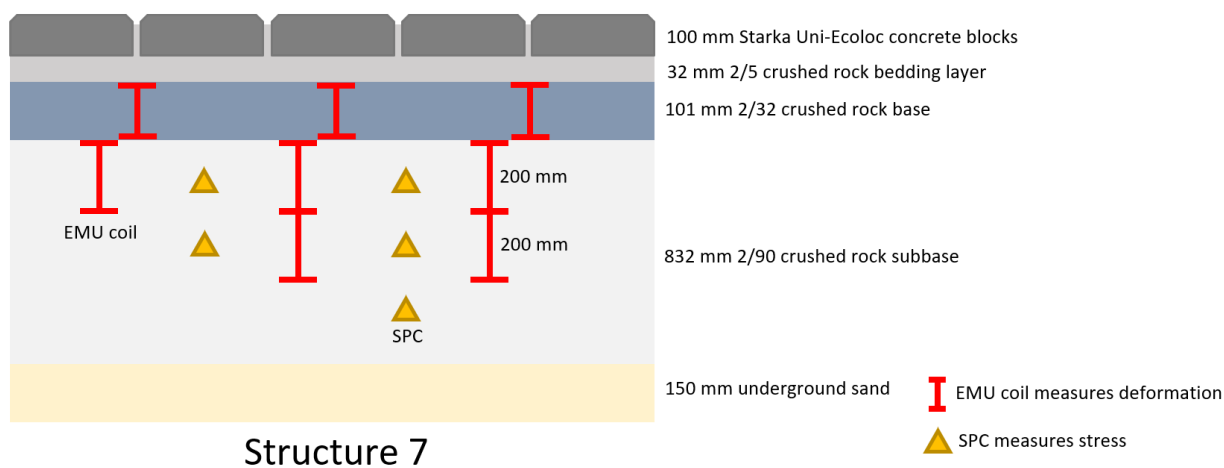
I detta projekt har beräkningsprogrammet ERAPave använts på markstensbeläggningar med öppna förstärkningslager dvs de har en stor porvolym som kan användas som fördröjningsmagasin för vatten. ERAPave beräknar vägkonstruktioners respons på trafikbelastning och bygger på MLET (MultiLayer Elastic Theory). Programmet kan laddas ned på sidan [Pavement design models for roads på vti.se](http://pavementdesignmodelsforroads.vti.se).

För att designa en beläggning i ERAPave behöver användaren välja en preliminär konstruktion bestående av olika typer av lager såsom asfalt, marksten, obundna berg- och terrassmaterial. Användaren behöver också mata in styvhetsparametrarna för dessa lager.

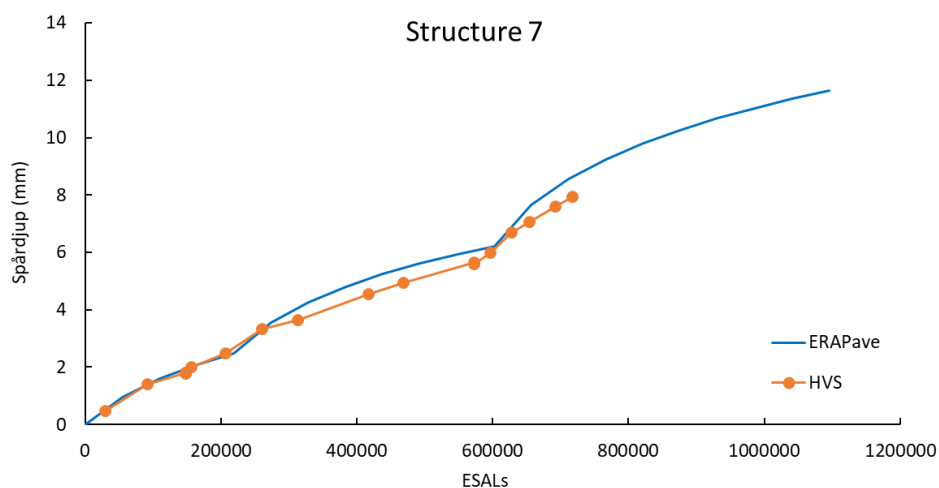
Tjockleken på de olika lagren justeras för att uppnå ett max spårdjup för en viss trafikbelastning och klimatförhållanden. ERAPave är flexibel för användaren och det går att välja olika typer av material i varje enskilt lager. Även om den i första hand är utvecklad för flexibla (asfalts) ytbeläggningar går det att använda modellen även för andra material som marksten och obundna material. Således kan den användas för grusvägar också. I det här fallet är utmaningen för användaren att få

materialparametrarna rätt. En utmaning för användaren av ERAPave är att bestämma materialegenskaperna för betongmarksten som i många fall används i stadsmiljö.

Tillämpningen av ERAPave för marksten gjordes först med hjälp av testdata från fordonssimulatoren (HVS- Heavy Vehicle Simulator). I tidigare forskningsprojekt har flera markstenskonstruktioner testats i HVS:en och resultat från 10 testkonstruktioner kunde användas (Rahman et al 2017). Exakta lagertjocklekar, fuktförhållanden och spårdjupsutveckling från bestämda axelbelastningar är kända från dessa tester. De materialparametrar som krävs för ERAPave-beräkningar var dock inte kända exakt. Dessa uppskattades baserat på laboratorietester på liknande material och tidigare erfarenheter. När man använder ERAPave behöver indata-värden och materialparametrar justeras tills det beräknade spårdjupet i ERAPave matchar det som uppmätts i HVS-testerna. Ett exempel på kurvanpassningen visas i Figur 6-10 Tabell 6-1. Detta gjordes på alla tio testkonstruktionerna och en uppsättning värden för materialegenskaper och modellparametrar valdes ut som fungerar för alla dessa konstruktioner. De erhållna intervallen av materialegenskaper (preliminära) presenteras i Tabell 6-1. Antagandet var att om dessa värdeintervall fungerar för dessa tio strukturer kommer de att fungera för andra liknande konstruktioner också. Detta arbete fortsätter så att modellens träffsäkerhet hela tiden förbättras.



Figur 6-9 Exempel på en konstruktion som testats i HVS:en.



Figur 6-10 Exempel på spårdjupsutveckling beräknat från ERAPave jämfört med resultat från HVS:en (ESALs motsvarar antal överfarter med standardaxlar).

Tabell 6-1 Material och modellparametrar för olika material som används i konstruktioner med betongmarksten och som kan användas i ERAPave programmet.

Lagertyp	Material	Torrt			Fuktmättad		
		Styvhetsmodul (MPa)	Konstant a ¹⁰	Konstant b ¹⁰	Styvhetsmodul (MPa)	Konstant a ¹⁰	Konstant b ¹⁰
Marksten av betong inklusive sättningslag makadam	2/5 mm bergkross	500	2	400	500	2	400
Bärlager	4/32 mm bergkross (tvättat)	300	15	600	300	18	520
	2/32 mm bergkross	350	15	500	320	18	520
	0/32 mm bergkross	350	15	500	320	18	520
Permeabel asfalt	Asfalt AG22 permeabel	7000	0.5	50	7000	0.5	50
Förstärkningslager	4/90 mm bergkross	200	15	600	300	18	520
	2/90 mm bergkross	350	15	500	320	18	520
	0/90 mm bergkross	350	15	200	320	15	520
Undergrund/terrass	Siltig sand	80	20	500	40	40	650

I Tabell 6-1 kan en användare uppskatta materialegenskaperna och designa en markstenskonstruktion för önskade förhållanden och prestandakriterier såsom spårddjup och trafikbelastning. Arbetet är under utveckling och kommer efterhand att förfinas och utökas Tabell 6-1 så mycket som möjligt så att den är mer tillförlitlig och täcker de materialtyper som vanligtvis används för markstenskonstruktioner.

Eftersom materialparametrarna mestadels uppskattas och baseras på relativt begränsade laborietestdata och erfarenhet, är det viktigt att ytterligare verifiera dem med fler tester och mätningar. Det finns data som inte är analyserad fullt ut från de genomförda HVS-testerna inklusive fallviktsanalyser och data från instrumentering i olika lager i några av testkonstruktionerna. Dessa data kan analyseras vidare och användas för ännu bättre validering. Laborietester (tex Triaxialtester) på några av materialen kan också förbättra denna tabell. Tyvärr kan inte alla typer av obundna bergmaterial testas i labb på grund av de stora partikelstorlekarna som används i markstenskonstruktioner. Sorteringar med maximal stenstorlek upp till 32 mm kan analyseras.

Parametrarna "a" och "b" i Tabell 6-1 är regressionskoefficienter för respektive materialtyp.

Parametrarna används av ERAPave för beräkning av permanent deformation (tex spårddjup).

Parametrarna uppskattas i första hand genom cykliska triaxialförsök eller, i andra hand, från andra typer av cykliska försök (tex kompressibilitetstest, PUMA test, cyklisk CBR test, wheel tracking test, HVS försök m.fl.).

Parametern "a" är associerat till den permanenta deformationens storlek och "b" beskriver hastigheten varvid permanent deformation ackumuleras. Parametern "a" är i hög grad beroende av materialtyp.

¹⁰ Parametrarna a och b är regressionskoefficienter för respektive materialtyp, och som används av ERAPave för beräkning av permanent deformation (spårddjup). Parametrarna bestäms i första hand genom cykliska triaxialförsök. Om data från triaxialförsök inte är tillgängliga kan parametrarna uppskattas baserat på liknande material som finns i ERAPave.

Parametern "a" tenderar öka för mjukare material och minska för styvare material. Även vid låg packningsgrad eller ökande vattenkvot ökar parametern "a" något i värde.

Parametern "b" är å andra sidan relativt oberoende av materialtyp. Detta betyder att relativt tillförlitliga resultat kan uppnås, för olika materialtyper, med liknande värde på parametern "b". Värdet av "b" kan påverkas något av tex material som initialt har låg packningsgrad. I detta fall sjunker värdet på parametern "b" något för att kompensera för den efter hand minskande ackumuleringen av permanenta deformationen allt eftersom packningsgraden ökar.

Uppmärksamhet bör fästas vid att utvecklingen av ERAPave är ett pågående arbete. Följaktligen måste beskrivningen ovan av hur parametrarna "a" och "b" varierar, tolkas med stor försiktighet. Om data från triaxialförsök inte är tillgängliga kan parametrarna uppskattas baserat på liknande material som tillhandahålls i ERAPave.

Fältmätningar och undersökningar av befintliga marstenskonstruktioner kommer att vara en utmärkt kompletterande valideringsmetod. Det arbetet har påbörjats i denna studie. Begränsningen blir dock att korrekt uppskatta den trafikbelastning och de fuktförhållanden som dessa konstruktioner har utsatts för. En annan begränsning är att det är svårt att veta om lagertjocklekar i fält verkligen stämmer med konstruktionsritningarna. HVS-testning av fler permeabla markstenskonstruktioner med rätt instrumentering är förmodligen det bästa alternativet men kostnaden att göra dessa tester är hög.

Efter fortsatt utvecklingen av Tabell 3-1 kan en riktlinje skapas för användningen av ERAPave för design av markstenskonstruktioner. Tabellvärdena är approximativa och uppdateras löpande efterhand som mer labbdata blir tillgängliga i ERAPave databasen.

7. Bärighetsmätning med fallvikt

Fallviktsmätning har utförts i några kommuner för att undersöka bärighet på dränerande vägkonstruktioner med öppet förstärkningslager. Flera av dem beskrivs i mer detalj i rapporten ”Multifunktionella urbana dagvattenanläggningar – referensanläggningar”.

Resultaten kan användas för att följa upp hur bra bärighet en konstruktion har efter byggnation. Dessutom kan de användas för att se om konstruktionen försämras eller förbättras över tid genom att komma tillbaka till samma plats. Vidare kan resultaten användas för att förbättra kunskapen om öppna dränerande lager och ge kunskap om materialparametrar som är viktiga för dimensionering. I detta projekt jämförs några typkonstruktioner med dränerande obundna material med standardkonstruktioner.

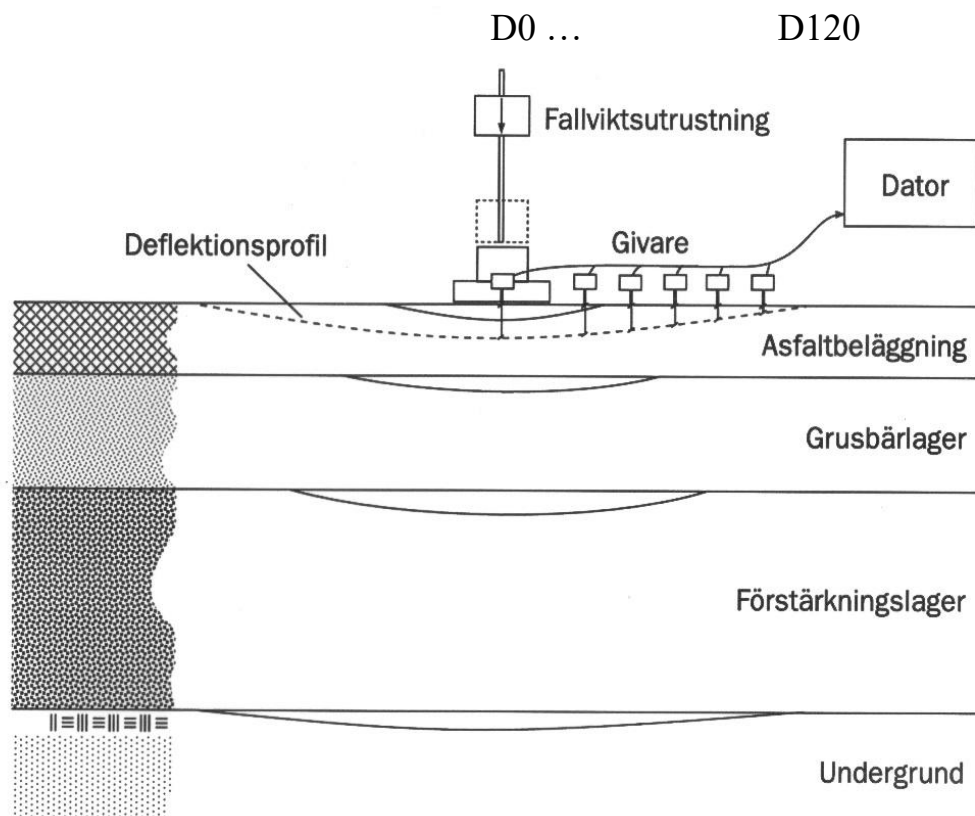
Kunskapen om materialegenskaper på dränerande material är begränsad. Det insamlade fallviktsdata ska därför ses som viktig information för att höja kunskapen och en möjlighet att följa upp med nya mätningar efter några års användning.

7.1. Mätning med fallvikt

En fallviktsmätning är tänkt att simulera en tung hjulöverfart genom att en fjäderbelastad vikt faller ner på en platta som ligger på ytan. Belastningen är normalt 50kN vilket motsvarar en standardaxel på ett tungt fordon. Ett antal lägesgivare (7st i dessa mätningar) registrera nedsjunkningen (eller deflektionen) på olika avstånd från centrumplattan (0, 20, 30, 45, 60, 90 och 120 cm), se Figur 7-1.

Mätresultaten redovisas som nedsjunkskurva (ibland kallad deflektionsprofil) från centrum D0 till givaren längs bort D120 (120 cm från centrum). Nedsjunkningen redovisas i μm . Den största nedsjunkning får man i D0 vilket också motsvarar hela väggroppens styvhet inklusive terrassen. Detta mått används för att beräkna en medelstyvhet eller ytmodul för väggroppen. Ytmodulen är en översiktlig och sammanvägt representation av hela konstruktionens strukturella tillstånd. Ytmodulen är relativt enkel att beräkna med hjälp av mätta deflektioner. Formler för detta beskrivs i TDOK2019:0463 [23]. Deflektioner längre bort från centrum representerar materialstyvhet längre ner i konstruktionen. Om man vet lagertjocklekarna kan man beräkna teoretiska styvheten i varje enskilt lager. Beräkningen är iterativ och behöver uppfylla vissa passningskrav för att den ska anses realistisk. Man ska dock vara försiktig med tolkning av dessa resultat om konstruktionen utgörs av många olika lager.

I denna rapport används resultaten för relativa jämförelser mellan de olika konstruktionerna. I de flesta fall jämförs en referensyta uppbyggd av obundna standardmaterial med konstruktioner uppbyggda av öppna bergmaterial som tillåter infiltration av vatten. Ytterligare en osäkerhet när man mäter med fallvikt är styvheten i markstenskonstruktioner som inte utgör ett kontinuerligt lager utan består av styva stenar med mjuka fogar emellan.



Figur 7-1 Mätprincip för fallviktsutrustning. Notera hur deflektionsprofilen förändras med djup och avstånd till centrum (Illustration Håkan Carlsson).

7.2. Hur kan resultaten tolkas och vad betyder de i praktiken?

FWD-test ger uppskattningar av styvheter hos de olika lagren i vägkonstruktionen genom att en matematisk kurvanpassning görs. Proceduren kallas bakåtberäkning och resultatet är styvhetsmoduler för de definierade lagren baserade på uppmätta deflektionsprofilen. Detta projekt har vi valt att titta enbart på ytmodulen som är ett enklare mått på hela konstruktionens sammantagna styvhet.

Styvhetsmätning ger dock inte nödvändigtvis någon indikation på konstruktionens förväntade livslängd eftersom det finns flera andra faktorer inblandade som tex stabilitet, nötning, fuktillstånd, temperatur och andra klimatrelaterade faktorer. Trafiken packar också efterhand ihop materialen och ökar styvheten. Allt detta gör att en enskild mätning vid en viss tidpunkt kan vara missvisande. Olika material är känsliga för olika saker, tex asfalt är temperaturkänsligt och blir mjukare en varm sommardag. Obundna material är känsliga för fukt och deformeras lättare vid hög fuktighet. Betong är känsligt för froströrelser och kan spricka. Detta sammantaget ger att mättillfället kan ge olika resultat vilket man behöver vara medveten om.

En annan begränsning av att tillämpa FWD-mätningar för markstenskonstruktioner är att det grundläggande antagandet är att skikten antas vara kontinuerliga, homogena och elastiska. Dessa kriterier uppfylls inte fullt ut i en vägkonstruktion tex. markstensbeläggningar.

Markstensbeläggningar består av styva betongstenar som är fogade med fogmaterial vilket gör att det kontinuerliga lagret bryts. Detta kan innebära att vissa fel uppstår i beräknade styvhetsvärdena. Övriga obundna lager kan inte heller fullt ut anses vara homogena eller elastiska. Det antas dock att felen är relativt små och att metoden fungerar bra för att jämföra styvheter mellan liknande konstruktioner så länge mätförfarandet görs lika varje gång. Det är också viktigt att påtala att det inte är möjligt att jämföra ytmoduler (eller andra typer styvhetsmoduler) mätta med olika metoder såsom plattbelastning

eller liknande. Varje metod ger värden baserat på mättekniken. Metoder kan till viss del kan korrelera men värdena baserade på olika mätprinciper som ger olika resultat.

8. Resultat från fallviktsmätning

Nedan redovisas resultaten från fallviktsmätning i Uppsala kommun – Rosendal, Campus Velling, Ängelholms kommun Munka Ljungby, och Vara kommun. Uppsala kommun – Rosendal

8.1. Fallvikt Uppsala kommun – Rosendal

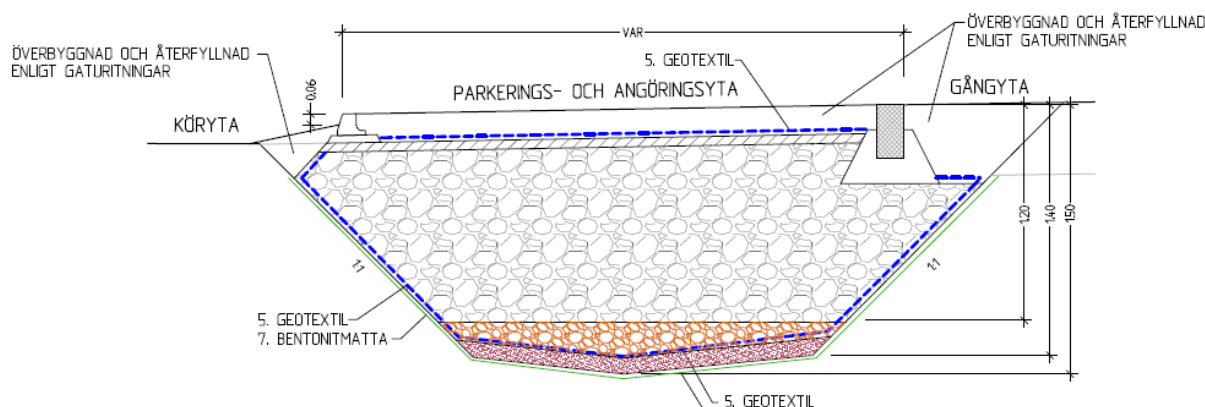
Figur 8-3 och Figur 8-4 visar var fallviktsmätning utförts vid Rosendal i Uppsala. Bilder på fallviktsmätning i Rosendal på olika ytor visas i Figur 8-5, Figur 8-6, Figur 8-7 och Figur 8-8. Sammanlagt 18 mätpunkter, från fem typsektioner, har sammanställts i Figur 8-9 och Figur 8-10. Redovisade resultaten är medelvärden från de fem typsektionerna. Konstruktionerna har tätt ytskikt med öppna förstärkningslager i ett BGG system, eller standard förstärkningslager (0/90). Konstruktionerna kan delas in i:

- Markstenskonstruktion med öppet förstärkningslager (22/90) från byggetapp 1.
- Markstenskonstruktion med öppet förstärkningslager (22/90) med biokol, annars samma som ovan från byggetapp 1.
- Markstenskonstruktion med standard förstärkningslager (0/90) från byggetapp 1.
- Markstenskonstruktion med öppet förstärkningslager och bitumenbundet bärlager (22/90) från byggetapp 2
- Ej färdigställd konstruktion med öppet förstärkningslager (22/90) från byggetapp 2 med bundet bärlager innan ytskikt av marksten har satts på plats.

Tabell 8-1 visar lagertjocklekar och gradering på använt material i konstruktionerna. En skillnad mellan BGG systemen är att etapp 1 utgörs av ytor vid sidan av gatan som är sammankopplade medan etapp 2 utnyttjar hela gatan. Skillnaden illustreras i Figur 8-1 och Figur 8-2. Etapp 2 innehåller också ett bitumenbundet bärlager som är tänkt att ge ytterligare bärighet.

Tabell 8-1. Konstruktionernas uppbyggnad.

		BGG konstruktion Etapp 1 mm	BGG konstruktion Gata Etapp 2 mm	Standard konstruktion Etapp 1 mm
Marksten (betong)		70	80	70
Sättmaterial 2/4		30	30	30
Bitumenbundet bärlager AG22 70/100		-	50	-
Obundet bärlager (samkross 0/32)		80	80	80
Öppet förstärkningslager (makadam 22/90)		Ca 1000	490	-
Förstärkningslager 0/90 (samkross)		-	-	Ca 1000
Öppet förstärkningslager 32/63		100 - 200	-	-
Avjämning/skyddslager (stenmjöl 0/8)		100	-	-



Figur 8-1 Illustration av konstruktion av BGG ytor etapp 1 vid parkeringsytor (Illustration Edge)

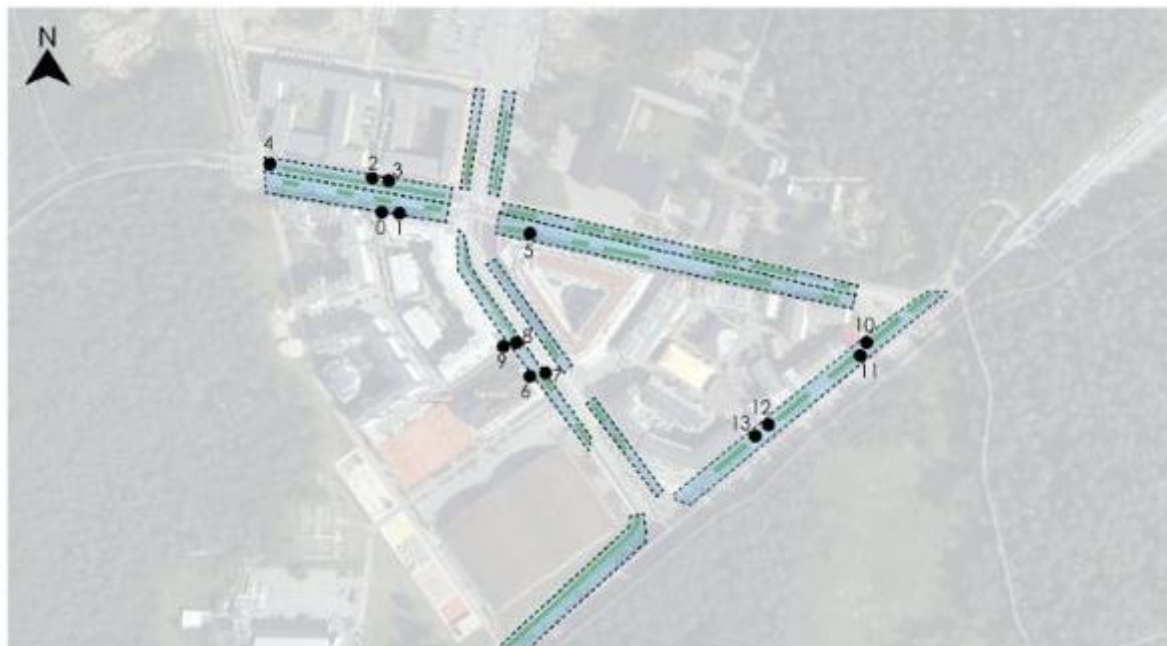


Figur 8-2. Illustration av BGG ytor under gata etapp 2 (Illustration Edge).

8.1.1. Resultat

Fallviktsmätning ger information om deflektion eller nedsjunkning på olika avstånd från centrum från en platta som belastas av nedfallande vikt. Deflektionsprofilen får olika utseende beroende på responsen i de underliggande lagren. Detta data ger information som kan räknas om till styvheten i lagren på olika djup. Det enklaste sättet är att använda D0 som är nedsjunkningen i centrum under fallvikten. Den ger ett medelvärde (dvs ytmodulen) på totala styvheten i konstruktionen. Den visas i Figur 8-10. Man kan se att ytmodulerna där öppet förstärkningslager med 22/90 ingår har ungefär samma värden som referensytorna med 0/90 material. Ytmodulerna för de dränerande konstruktionerna är mellan 171 och 205 MPa. Referensytorna har 199 MPa. Man kan därmed säga att det inte är någon signifikant skillnad mellan de öppna förstärkningslagerytorna och standardkonstruktionerna med 0/90 i detta fall. Det är vidare ingen stor skillnad mellan ytorna från etapp 2 som har ett bundet bärlager och ytorna från etapp 1 som saknar detta lager. Det är därmed oklart om det bundna bärlagret ger en ökad styvhet. Ytan som inte var färdigställd där mätning gjordes direkt på det bundna bärlagret hade störst styvhet. Eventuellt kan andra platsspecifika saker påverka som tex mängden arbetsfordon som packar ytan och packningsutförande spela in. Det kan också

handla om att markstenen och sättlagret var relativt nylagd vid mättillfället och behöver packas till av trafik för att uppnå full styvhet.



Figur 8-3 Karta som visar plats för fallviktsmätning i Uppsala Rosendal, etapp 1 (Illustration Edge).



Figur 8-4. Karta som visar plats för fallviktsmätning i Uppsala Rosendal, etapp 2 Illustration Edge).



Figur 8-5. Fallviktsmätning Rosendal Etapp 1, Uppsala på Vårdsätravägen Foto Fredrik Hellman).



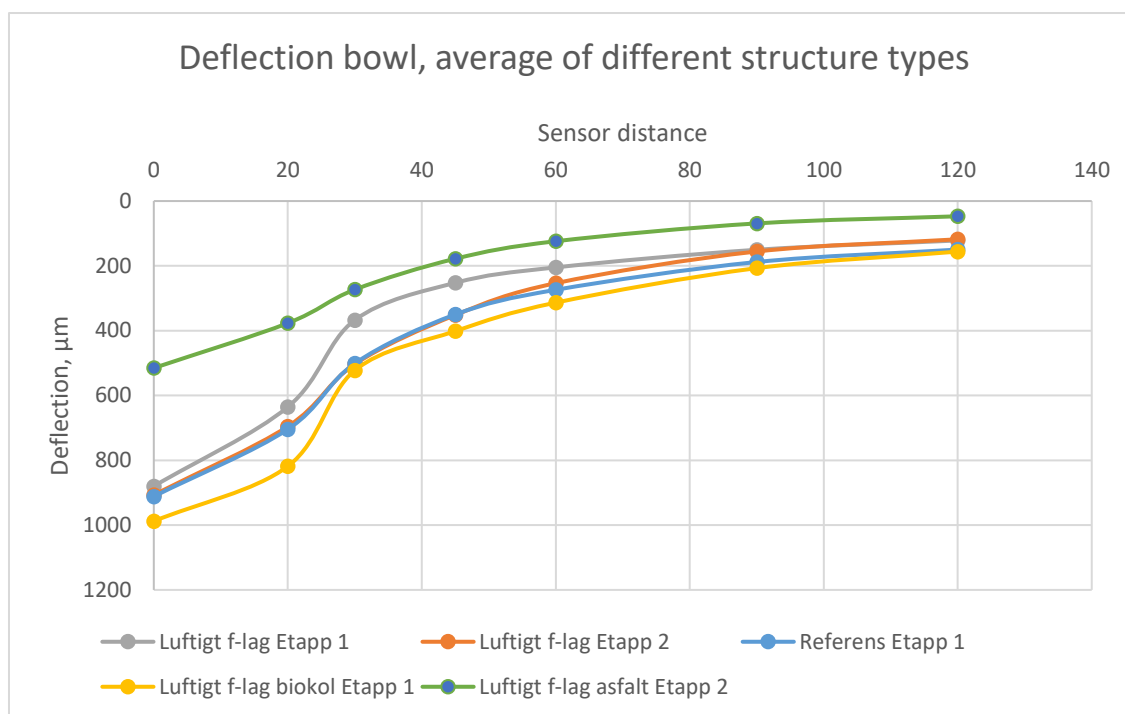
Figur 8-6. Fallviktsmätning Rosendal etapp 1, Uppsala på Torgny Segerstedts allé (Foto Fredrik Hellman).



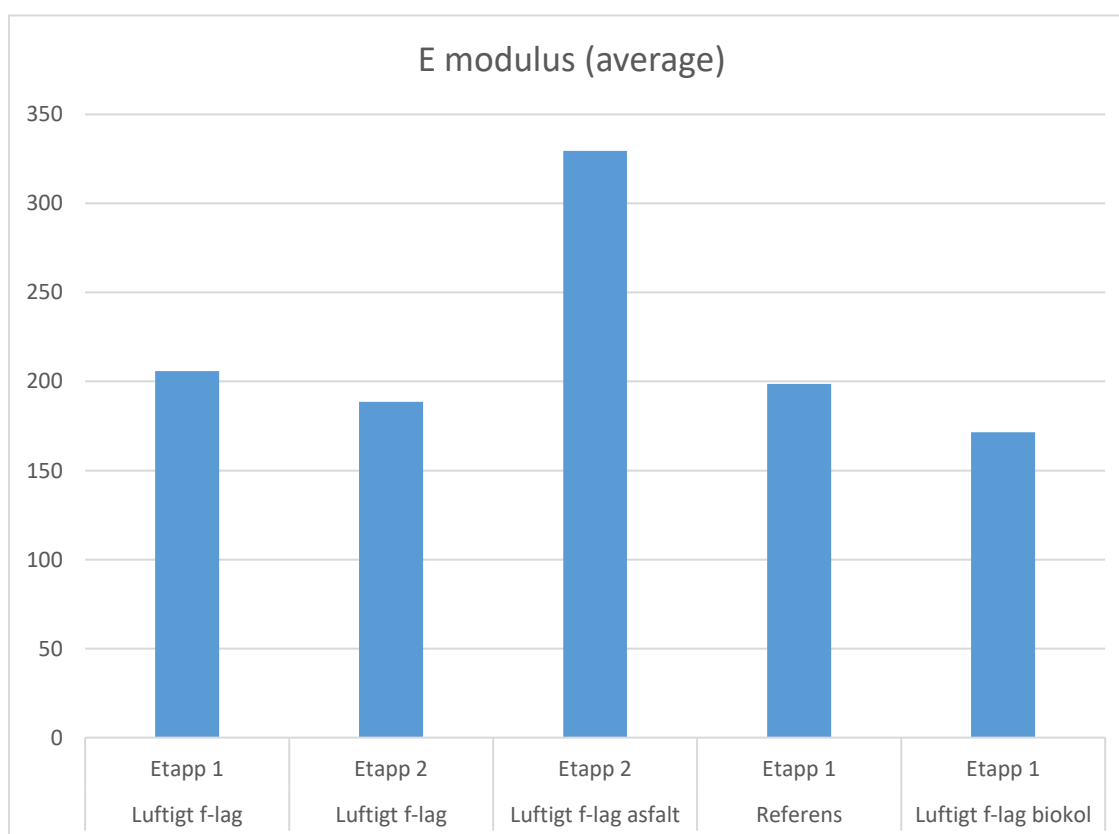
Figur 8-7. Fallviktsmätning Rosendal etapp 2 på Amanuengsgatan (Foto Fredrik Hellman).



Figur 8-8. Fallviktsmätning på obundet bärlager i Rosendal etapp 2 på Dekangatan (Foto Fredrik Hellman).



Figur 8-9. Figuren visar medelvärden av deflektionsdata från fallviktsmätning från de 5 olika typsektionerna i Uppsala Rosendal.



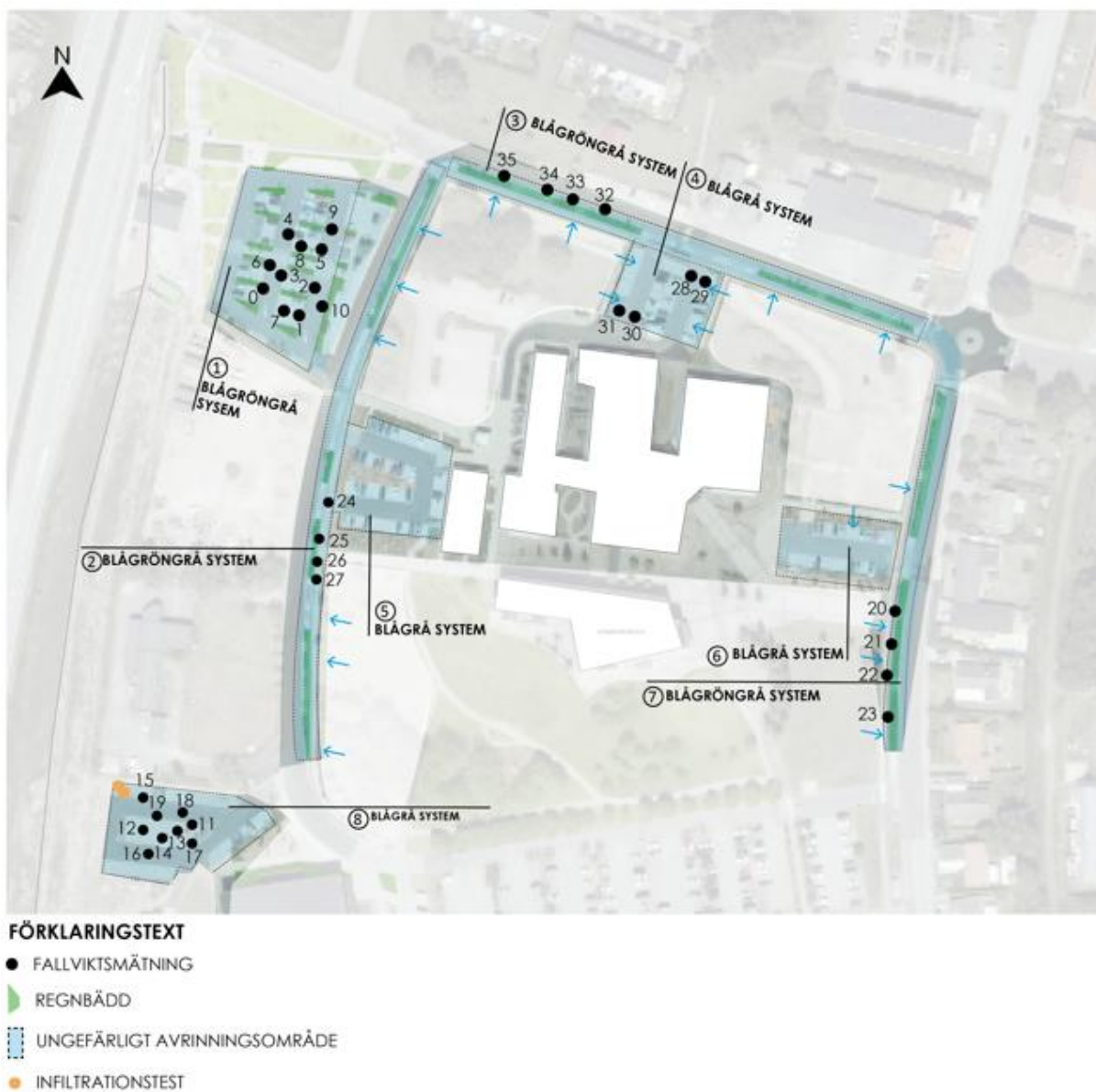
Figur 8-10. Figuren visar beräknade medelvärde för ytmoduler från de fem typsektionerna baserade på deflektionsdata från Figur 8-9.

8.2. Fallvikt Campus i Vellinge

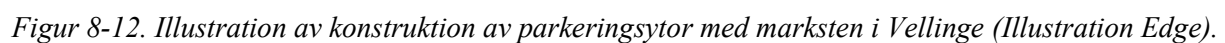
Figur 8-11 visar var fallviktsmätningarna utförts i Vellinge. Olika typer av konstruktioner har testats. Dränerande gräsarmerad markstenbeläggning med dränerande obundna material på parkeringsytor (Figur 8-12, Figur 8-14 och Tabell 8-2) har testats på 18 platser. Bredvid parkeringsytorna har även 11 ytor som inte är dränerande provats som referens. Dessa är körytor med asfaltsyta och 0/32 och 0/90 obundna bergmaterial (Figur 8-12 sektion A, Figur 8-15 och Tabell 8-3). Förutom parkeringsytorna har även cykelvägar med asfalt provats. Dessa har en uppbyggnad enligt Tabell 8-4 sektion B, samt Figur 8-13 och Figur 8-16.

8.2.1. Resultat

Medelvärde av deflektionsvärdena visas i Figur 8-17. Man kan se att deflektionen är lägre under 0 och 20 givarna för referensytorna. Det indikerar att ytan dvs asfalten är styvare än den gräsarmerade betongmarkstenen. Deflektionskurvorna följer därefter varandra vilket indikerar att övriga obundna material som bygger konstruktionerna är ungefär lika i styvhet. Figur 8-18 visar konstruktionernas ytmodul. Parkeringsyta med gräsarmering ligger på 174 MPa vilket kan jämföras med standardparkering på 385 MPa. Att deflektionsvärdena förutom de närmast belastningscentrum dvs avstånd 0 och 20 cm är lägre än övriga deflektionsvärden från ytorna med gräsarmering kan tolkas som att den huvudsakliga styvhetsskillnad mellan dessa två ytor är val av ytskikt dvs asfalt är styvare än gräsarmerad sten i detta fall.

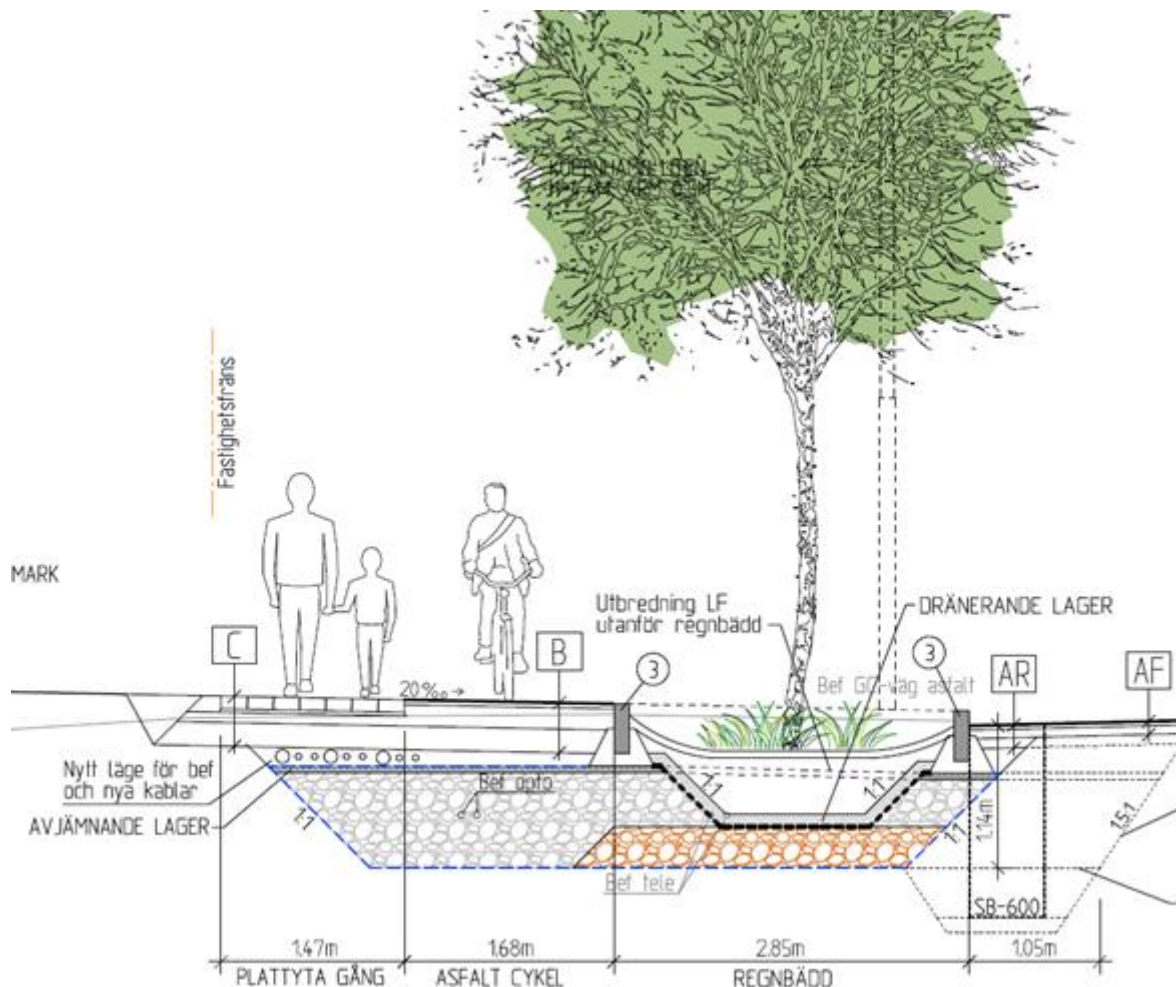


Figur 8-11. Karta över utförda fallviktsmätningar i Vellinge(Illustration Edge).



Överbyggnadstabell sektion EL			
	Benämning	Material	Tjocklek (mm)
	Dränerande beläggning	Betong marksten 263*88	70
	Sättmaterial	Makadam 2/5	30
	Dränerande bärlager	4/32	80
	Öppet förstärkningslager	22/90	460
	Öppet förstärkningslager	32/63	300-400

Överbyggnad sektion A körbana			
	Benämning	Material	Tjocklek (mm)
	Beläggning	ABT11 70/100	35
	Bundet bärlager	AG22 70/100	70
	Obundet bärlager	Krossat bergmaterial 0/40	80
	Förstärkningslager	Krossat bergmaterial 0/90	420



Figur 8-13 Illustration över konstruktionen av gång och cykelväg samt växtbädd (Illustration Edge).

Tabell 8-4 Lagertjocklek för cykelväg med asfalt samt gångväg med marksten i Vellinge (se figur 8-1)3.

Överbyggnadstabell sektion B Asfalt		
Benämning	Material	Tjocklek (mm)
Beläggning	ABT 160/220	40
Obundet bärlager	Samkross 0/32	170
Obundet förstärkningslager	Samkross 0/90	190

Överbyggnadstabell sektion C		
Benämning	Material	Tjocklek (mm)
Beläggning	Betongmarksten	100
Sättmaterial	Sand	30
Obundet bärlager	Samkross 0/32	80
Obundet förstärkningslager	Samkross 0/90	190

Underbyggnad			
	Benämning	Material	Tjocklek (mm)
	Avjämningslager	8/16	50
	Öppet förstärkningslager	22/90	400-950
	Öppet förstärkningslager	32/63	330-380
	kokkosmatta		
	Geotextil		



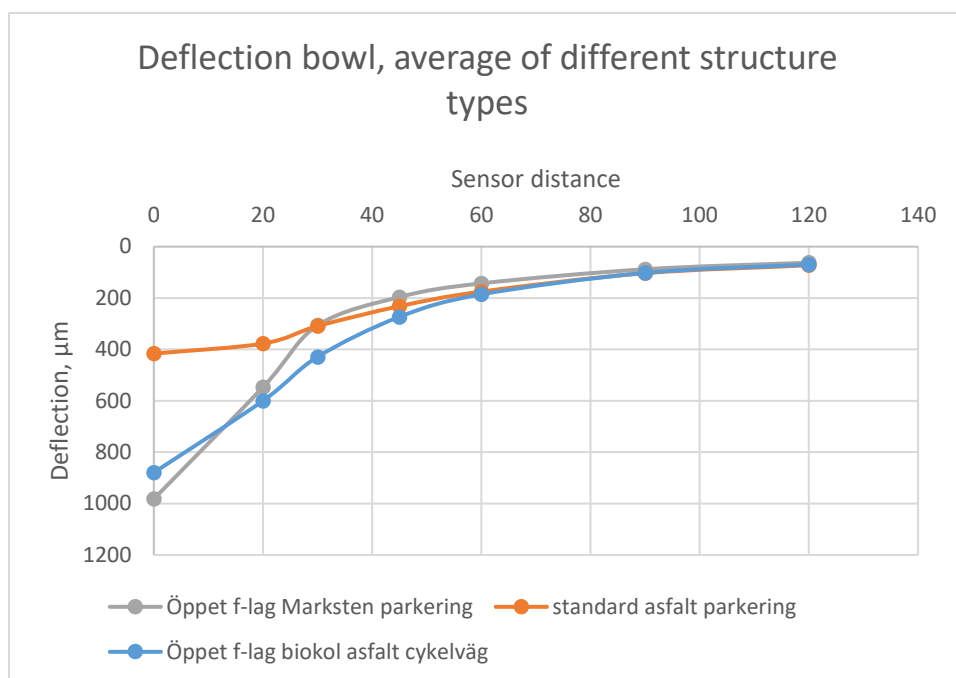
Figur 8-14. Fallviktsmätning på gräsarmerad parkeringsyta i Vellinge. Standard konstruktion med asfalt i anslutning till p-ytorna har använts som referens (Foto Fredrik Hellman).



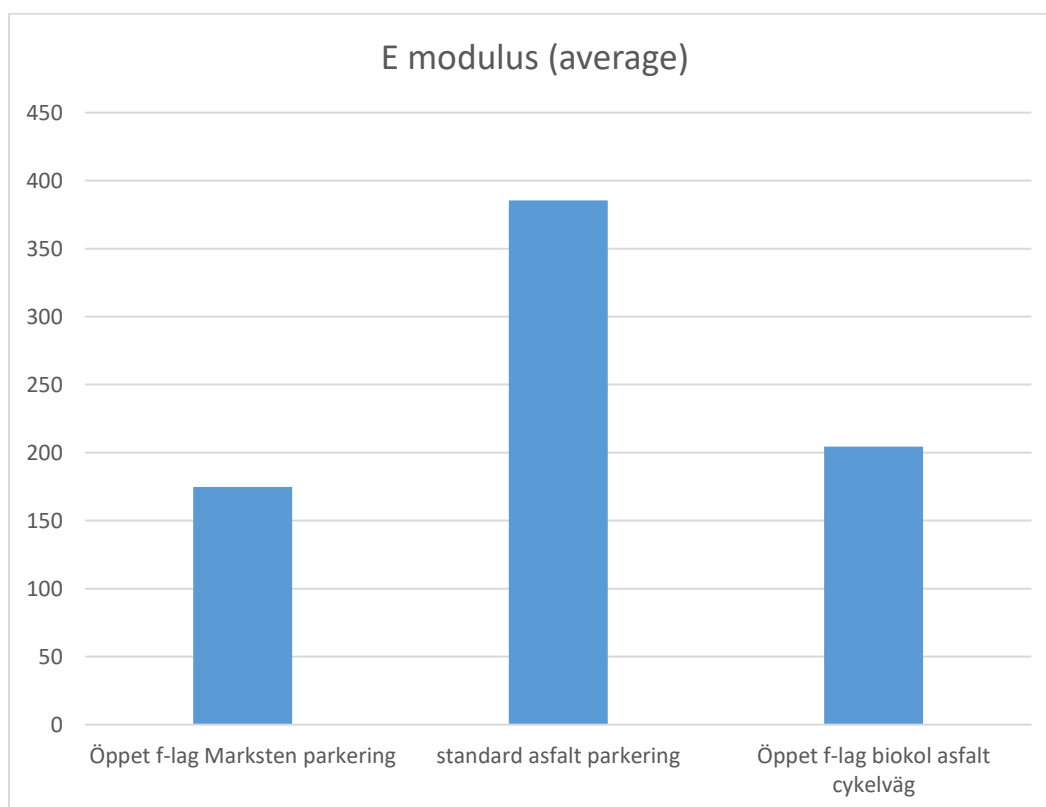
Figur 8-15. Standard parkeringsyta i Vellinge (Foto Fredrik Hellman).



Figur 8-16. Fallviktsmätning på cykelväg med öppet förstärkningslager i anslutning till växtbädd (Foto Fredrik Hellman).



Figur 8-17. Deflektionsdata från fallviktsmätning i Vellinge.



Figur 8-18. Ytmoduler från tre olika typ konstruktioner i Vellinge.

8.3. Fallvikt Ängelholms kommun - Munka Ljungby

I Ängelholms kommun vid Munka Ljungby har det byggts regnbäddar för att minska risken för översvämning med BGG-konstruktion som sträcker sig ut under körbanan på gatorna i ett villaområde. Figur 8-19 visar området och var fallviktsmätningarna har gjorts. 15 mätningar har gjorts på asfaltsytor med öppet förstärkningslager och 28 mätningar på referensytor med standard

förstärkningslager. Uppbyggnaden och lagertjocklek beskrivs i Tabell 8-5 och Figur 8-20. Fallviktsmätning har utförts på den dränerande konstruktionen samt referensmätning på vardera sida om växtbädden på standardkonstruktion (Figur 8-21 och Figur 8-22).

Tabell 8-5. Lagertjocklekar och uppbyggnad av dränerande- och standardkonstruktion.

Benämning	Gradering	Dränerande öppet förstärkningslager Lagertjocklek (mm)	Standardkonstruktion Lagertjocklek (mm)
ABT		35	35
AG		50	50
Bärlager	0/32	80	80
Öppet förstärkningslager	16/32	100	
Öppet förstärkningslager	32/90	400	
Förstärkningslager	0/90		500

8.3.1. Resultat

Medelvärden av deflektionsvärdena från de dränerande ytorna respektive standardkonstruktionerna visas i Figur 8-23. De beräknade ytmodulerna visas i Figur 8-24. En jämförelse visar att standardkonstruktionerna har en högre styvhet och lägre deflektion än BGG konstruktionerna. Skillnaden är dock inte så stor och i praktiken har inte de BGG ytorna mer spår eller skador efter några år i drift (dock lågtrafikerad gata). Ytmodulen för de BGG ytorna är i medel 393 MPa och för referensytorna 483 MPa. Dessa värden bedöms som höga för användningsområdet.



FÖRKLARINGSTEXT

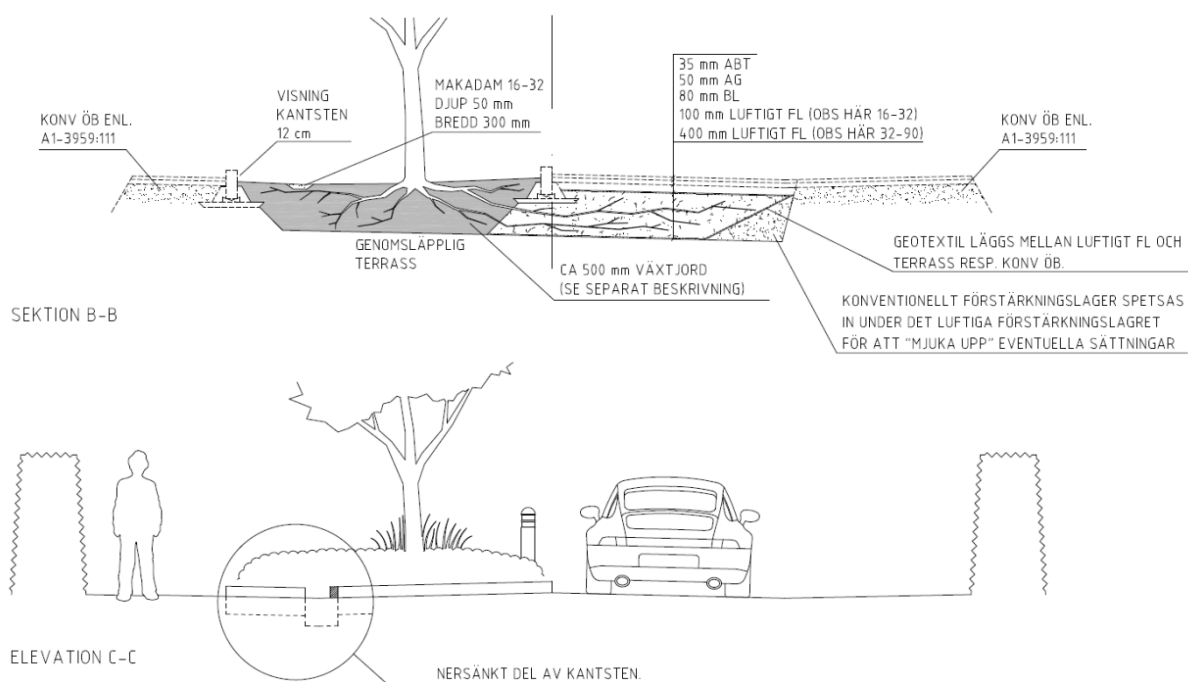
● FALLVIKTSMÄTNING

→ REGNBÄDD

○ ÖPPET FÖRSTÄRKNINGSLAGER

■ UNGEFÄRLIGT AVRINNINGSSOMRÅDE

Figur 8-19. Karta som visar plats för fallviktsmätning i Munka-Ljungby (osäkerhet i GPS-punkterna gör att några hamnar utanför vägen; Illustration Edge).



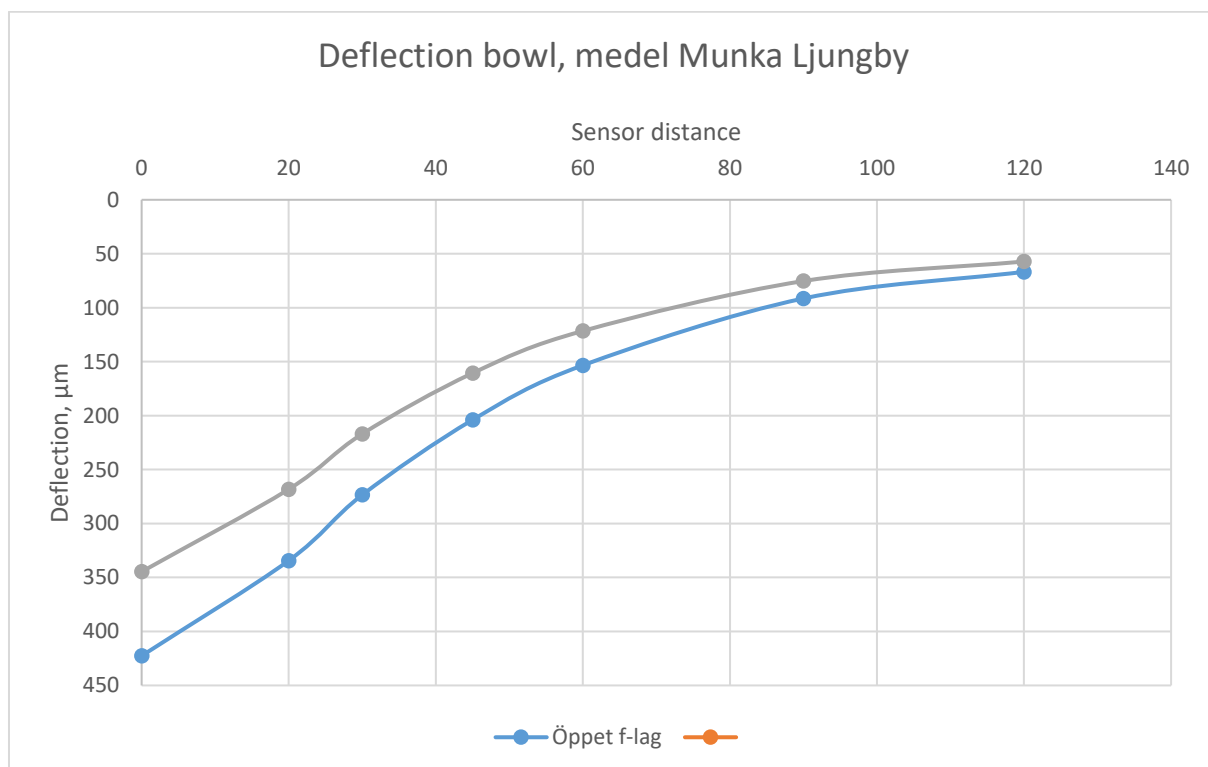
Figur 8-20. Konstruktionsritning av växtbädd och tillhörande väg med dränerande förstärkningslager Illustration Edge).



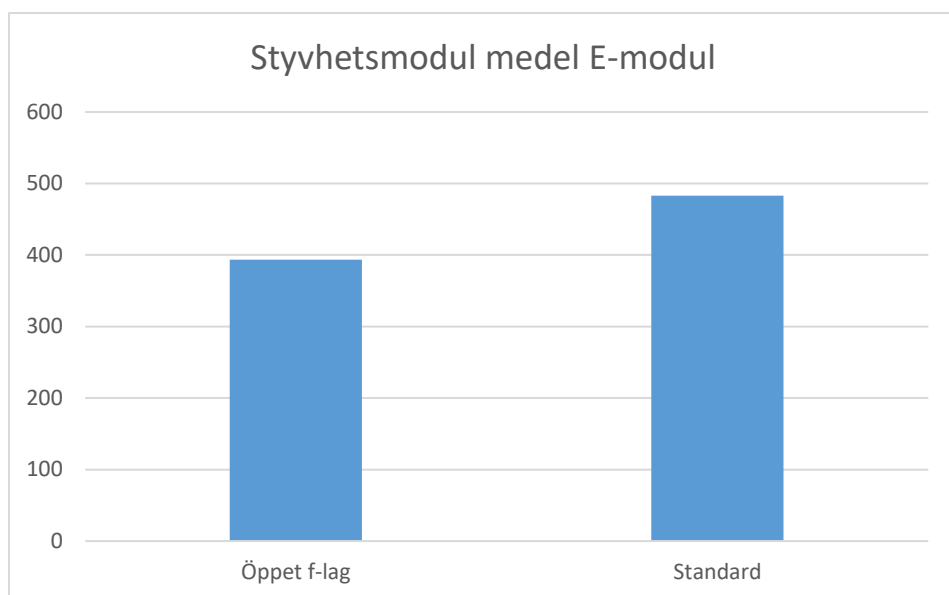
Figur 8-21. Fallviktsmätning på dränerande konstruktion i Munka Ljungby (Foto Fredrik Hellman).



Figur 8-22. Fallviksmätning på standardkonstruktion i Munka Ljungby (Foto Fredrik Hellman).



Figur 8-23. Figuren visar medeldeflektioner på 15 platser med dränerande öppet förstärkningslager och 28 platser med standard förstärkningslager.



Figur 8-24. Figuren visar beräknade medelvärden för ytmoduler för konstruktion med dränerande öppet förstärkningslager baserade på deflektionsdata från Figur 8-23.

8.4. Fallvikt Vara

I Vara kommun ligger en industriyta där Jem och Fix har sin byggvaruhandel. Ytan är 2800 kvadratmeter och belagd med dränerande marksten. Ytan färdigställdes under 2020. Denna yta har ett dränerande ytskikt med underliggande dränerande obundna lager enligt Tabell 8-6. Ytan trafikeras av varuhusets kunder i bil och andra varutransporter som tex lastbilar och truckar. Tio fallviktsmätningar har gjorts på olika ställen på ytan enligt Figur 8-25 och Figur 8-26 visar fallviktsutrustningen i färd med att mäta vid Jem och Fix varulager. En av mätpunkterna (244) gjordes som referens på en asfalterad yta. Konstruktionen under mätpunkt 244 är okänt, men antas vara byggd med traditionella obundna material och med liknande lagertjocklekar som resterande mätpunkter.

Tabell 8-6. Uppbyggnad av dränerande markstenskonstruktion vid Jem och Fix.

	Sortering	Tjocklek (mm)
Dränerande marksten Delta drain		80
Sättmaterial	2/5	30
Bärlager	2/32	80
Förstärkningslager	2/90	400

8.4.1. Resultat

Resultaten visar att deflektionerna från fallviktsmätningarna varierar ganska mycket mellan de olika mätplatserna (Figur 8-27). Orsaken till detta kan vara att det är olika installationer som tex kabel- och VA-installationer under markytan alternativt att packningen av de obundna lagren blivit ojäm. De beräknade ytmodulerna (Figur 8-28) varierar följaktligen också. Skillnaderna mellan högsta och lägsta värde är relativt stor och varierar mellan 50 MPa och 220 MPa. Alla punkter utom tre ligger dock över 144 MPa vilket ändå bedöms som bra med tanke på användningen.



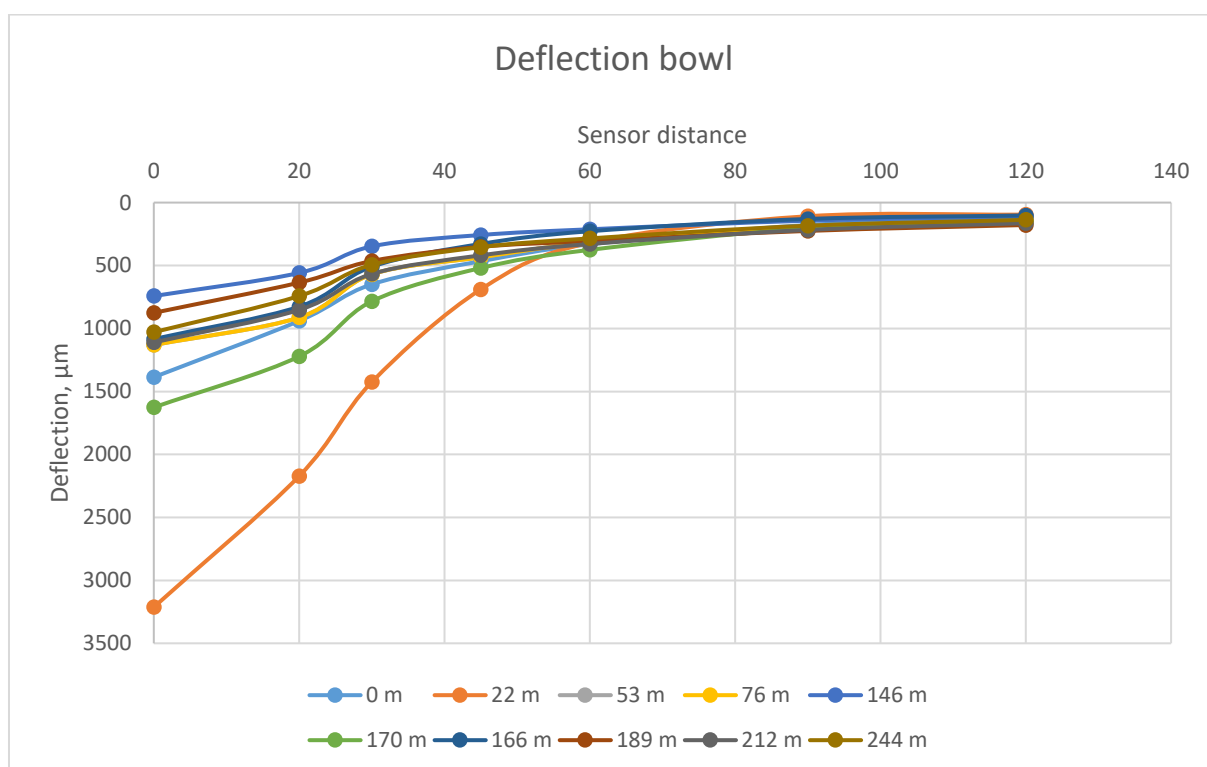
FÖRKLARINGSTEXT

- FALLVIKTSMÄTNING
- UNGEFÄRLIGT AVRINNINGSOMRÅDE
- INFILTRATIONSTEST

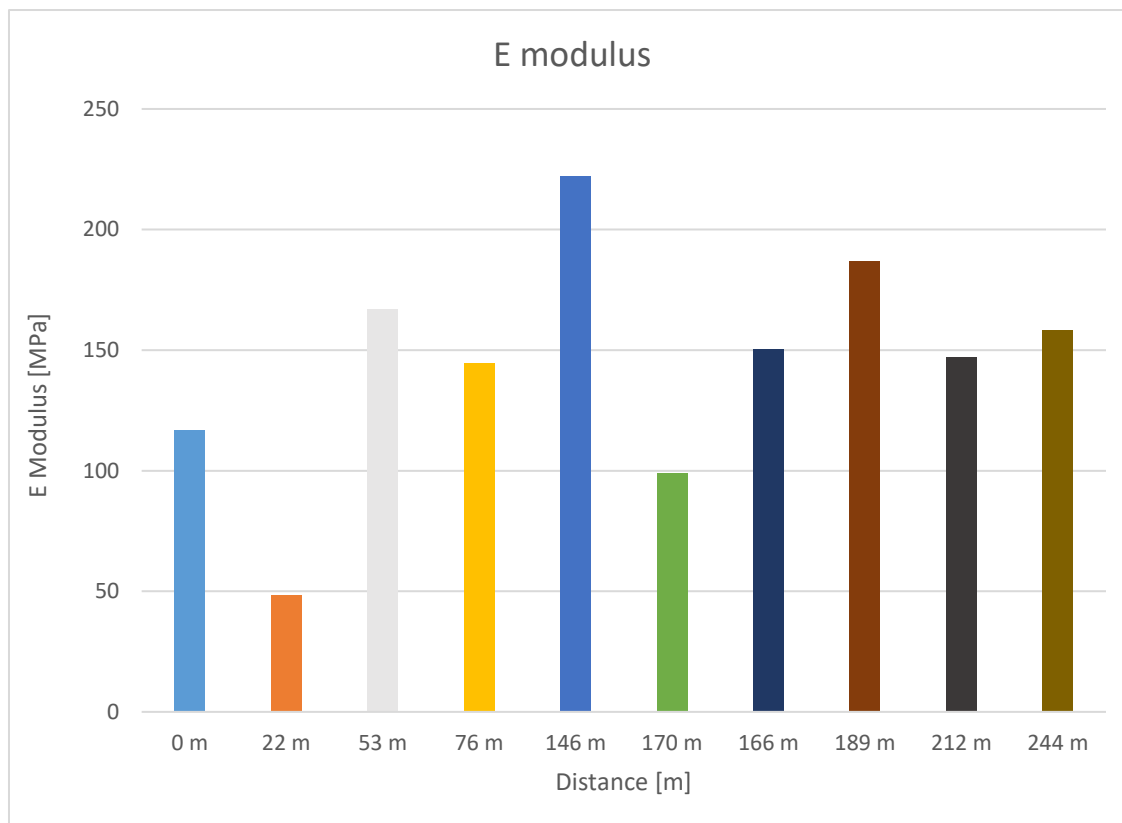
Figur 8-25. Karta som visar plats för fallviktsmätning i vid industriyta i Vara (Illustration Edge).



Figur 8-26. Fallviksmätning på dränerande markstensyta vid Jem & Fix i Vara (Foto Mikael Bladlund).



Figur 8-27. Deflektioner från fallviksmätning vid Jem & Fix. Sammanlagt enskilda 10 punkter.



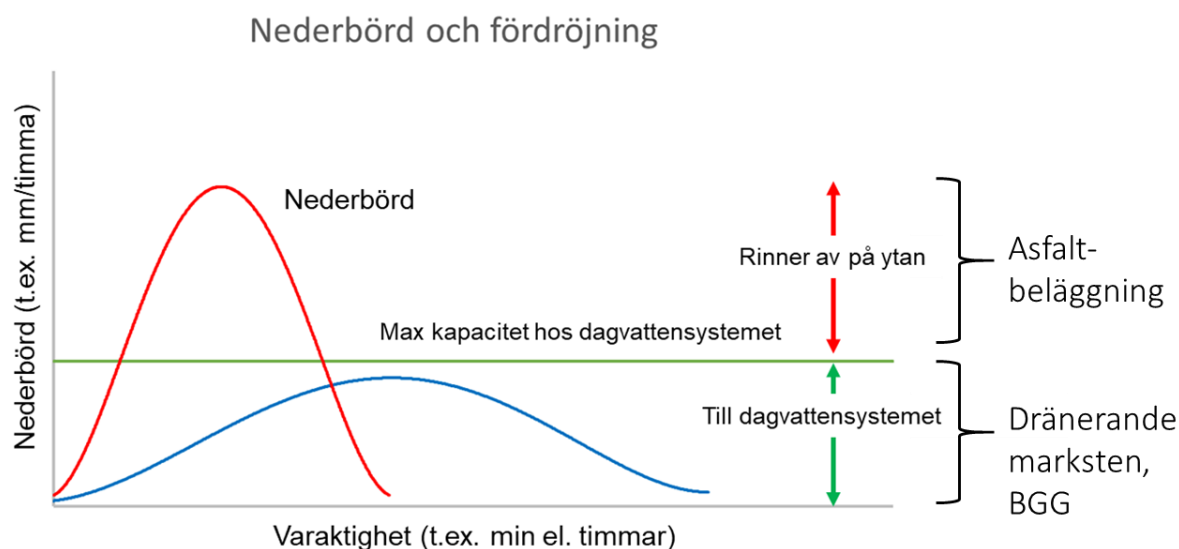
Figur 8-28. Beräknade ytmoduler från fallviktsmätningarna vid Jem och Fix (Vara). 100-årsregn med varaktighet 10 minuter.

9. Infiltrationsmätning på dränerande beläggningar

När det regnar på en asfalterad yta (den röda kurvan i Figur 9-1) så startar regnet normalt med låg intensitet. Intensiteten ökar sedan succesivt för sedan avta gradvis. Väl på ytan behöver vattnet någonstans att ta vägen. Volymen vatten som behöver tas om hand motsvarar arean under den röda kurvan. Om det är många asfalterade ytor som är kopplade till samma dagvattensystem kommer volymen vatten snabbt att överstiga dagvattensystemets maximala kapacitet (den gröna linjen i Figur 9-1). Vattnet som inte får plats i dagvattensystemet kommer att rinna av på ytan. Avrinningen skapar stående vatten, och vid intensiv nederbörd, översvämningar.

En lösning på problemet är att hitta ett sätt att ”platta” till den röda kurvan i diagrammet så att avrinningen i stället blir som den blåa kurvan (i Figur 9-1) och hamnar under dagvattensystemets maximala kapacitet. Volymen vatten (arean under kurvorna) är den samma för båda kurvorna. I scenariot med den blå kurvan fördelas samma volym av vatten ut över en längre tidsperiod, så att inte allt vatten kommer samtidigt till dagvattensystemet. I dränerande beläggningar infiltreras dagvattnet genom fogen och ned till förstärkningslagret. Förstärkningslagret fungerar som ett magasin som mellanlagrar, fördröjer och renar dagvattnet innan det förs vidare till undergrund eller dagvattensystem.

För att kunna infiltrera dagvatten över lång tid är det viktigt att fogarna inte sätts igen så att kapaciteten inte underskrider behovet att klara dimensionerande nederbörd, t ex ett 30-, eller 50-årsregn.



Figur 9-1 Illustration av nederbörd och avvattning av traditionell konstruktion och BGG-konstruktion med dränerande markstensbeläggning (Illustration Erik Simonsen).

9.1. Hur estimeras beläggningens infiltrationskapacitet?

Med tiden sätts fogarna igen av smuts och partiklar från biltrafik och annan mänsklig aktivitet, och successivt minskar därför fogens kapacitet att infiltrera vatten. Hur mycket infiltrationsförmågan minskar beror på lokala förutsättningar som närhet till grönområden, flygsand, halkbekämpningsmaterial, föroreningar från trafik och fordon, frekvens av DoU-åtgärder, dubbdäcksfrekvens och ytans användningsområde etc. Dessa faktorer måste beaktas i planeringsskedet och ofta räcker det med enkla åtgärder som naturliga vindskydd eller förhöjda kantstöd.

Beläggningens infiltrationskapacitet ska överstiga behovet över hela dess livslängd med givna drift och underhållsintervall. För att bedöma detta är det tre egenskaper som behöver bestämmas:

- Initial Infiltrationskapacitet
- Förändring av infiltrationskapacitet över tid
- Intensitet för dimensionerande nederbörd

9.1.1. Initial infiltrationskapacitet

När beläggningen är nylagd är den helt opåverkad av igensättning. Beläggningen infiltrerar vatten endast igenom fogen. Beläggningens infiltrationsskapacitet beror därför helt på fogmaterialets permeabilitet, dvs fogmaterialets förmåga att infiltrera vatten, samt hur mycket fog som ytan har.

För att beräkna beläggningens initiala (opåverkade) infiltrationskapacitet behöver du veta:

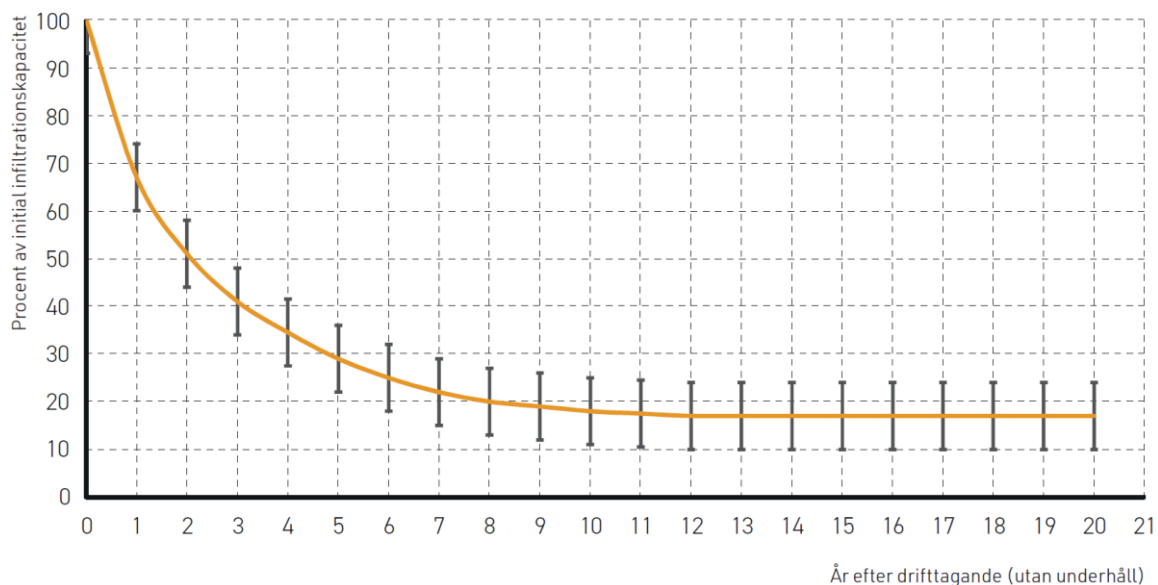
- Fogmaterialets permeabilitet
- Beläggningens fogarea

Enligt AMA ska en dränerande beläggning ha minst 8 % fogarea (DCG.22 Beläggning av betongmarksten). De flesta dränerande markstensbeläggningar har dock betydligt högre fogarea. Även beläggningar som klarar mycket tung trafik ligger kring 10–13 % fogarea. Fogmaterialet ska vara makadam 2/5 (enligt tabell AMA DCG/1.). Makadam 2/5 har mycket hög permeabilitet och kan infiltrera en 36 meter hög vattenpelare på en timme. Fogmaterialets permeabilitet är ca $1,0 \times 10^{-2}$ m/s (motsvarar 36 000 mm/h). Med 13% fogarea blir beläggningens initiala infiltrationskapacitet 4680 mm/h.

9.1.2. Förändring av infiltrationskapacitet över tid

För att dimensionera rätt måste du ta hänsyn till hur mycket fogmaterialet förväntas sättas igen under den valda underhållsperioden.

Omfattande forskning från hundratals mätstationer i bl a Tyskland visar att infiltrationskapaciteten sjunker asymptotiskt under 8 - 12 år. Därefter är infiltrationsförmågan relativt konstant. Slutvärdet är normalt ca 10–25 % av den initiala infiltrationen. Reduktionsfaktorn (0,1-0,25) är hur mycket den initiala infiltrationen måste reducerats i förhållande till hur hög infiltrationen kommer vara efter många års drift. Om vi antar att reduktionsfaktorn är 20% efter 8 år enligt figur 9-2 blir infiltrationskapaciteten 936 mm/h om den initial är 4680 mm/h. Ibland lägger man på en säkerhetsfaktor på tex 2 för att ha marginal för oväntat hög igensättning eller ökade regnmängder och då blir den beräknade infiltrationskapaciteten 468 mm/h efter 8 år drift. Dessa exempel finns beskrivna i Svensk Markbetong (2019).



Figur 9-2 Illustration av belägningens infiltrationskapacitet över tid (efter [8]).

9.1.3. Intensitet för dimensionerande nederbörd

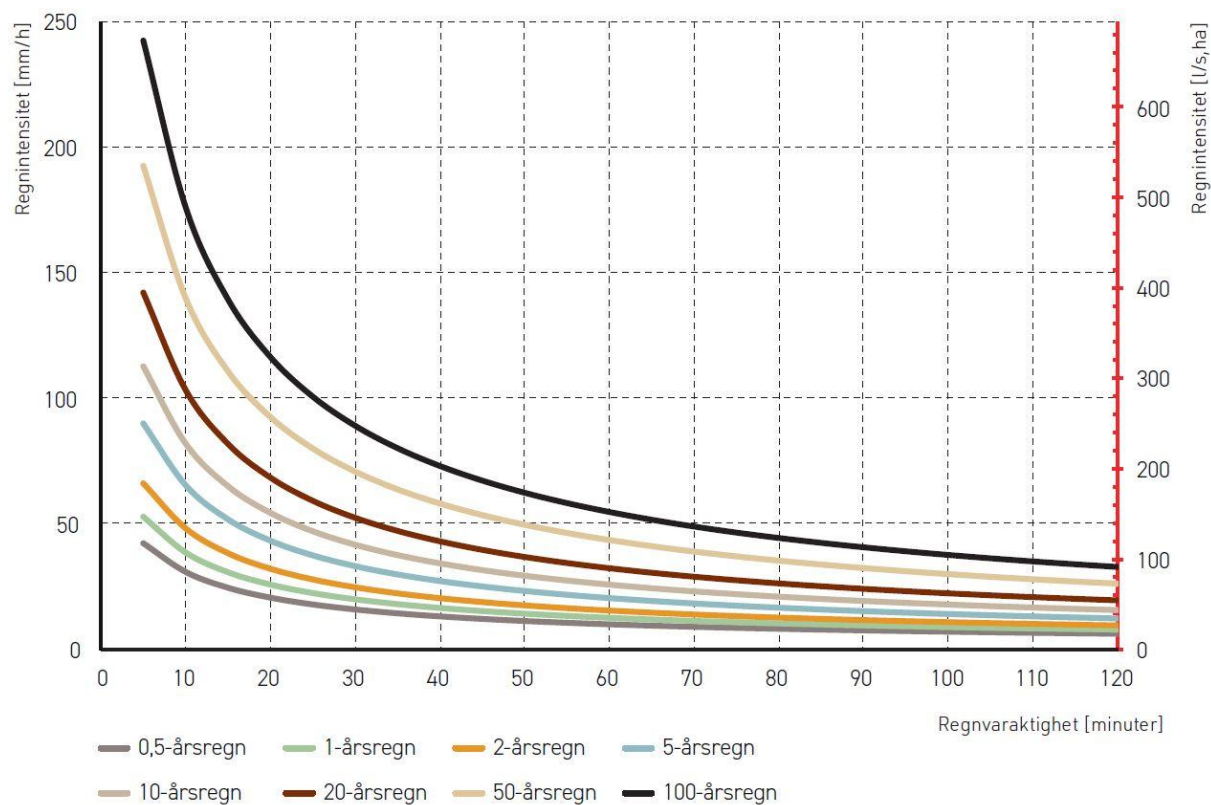
Vi har nu räknat fram belägningens infiltrationskapacitet efter ca 8 - 12 år till 468 mm/h. Siffran säger inget i sig, utan måste sättas i relation till vilken dimensionerande nederbörd som gäller för den aktuella ytan.

Om nederbördens intensitet (mm/h) överstiger belägningens infiltrationskapacitet kommer en del av nederbörden rinna av på ytan. Hur mycket som rinner av på ytan motsvarar nederbördens intensitet minus belägningens infiltrationskapacitet. Endast när infiltrationskapaciteten är 0 mm/h (tex som för asfalt) kommer allt vatten rinna av på ytan.

Fördröjning av dagvatten dimensioneras vanligen utifrån ett specifikt fördröjningskrav, tex 20 mm nederbörd eller utifrån nederbörd som statistiskt återkommer med vissa intervall, tex 30-, eller 50-års regn. Specifika fördröjningskrav säger normalt inget om krav på infiltrationskapacitet.

30- och 50-årsregn kan däremot ha olika intensitet beroende på hur länge de varar. Det är viktigt att komma ihåg att t ex ett 50-års regn inte bara har ett definierat scenario. Samma 50-årsregn kan beskrivas på många olika sätt beroende på regnets varaktighet.

Figuren nedan visar exempelvis att ett 50-års regn som varar i 10 minuter har en intensitet på ca 140 mm/h och ett som varar i 30 minuter har intensitet på ca 75 mm/h.

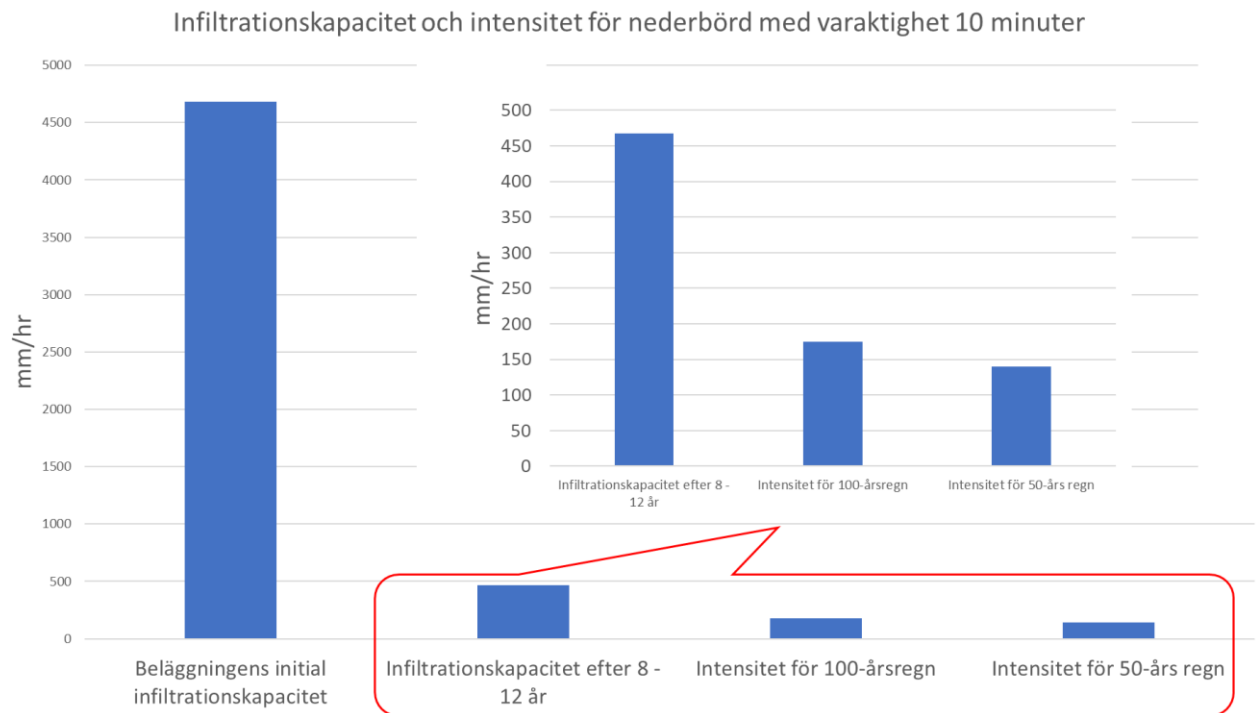


Figur 9-3 Regnintensitet som funktion av återkomsttid och varaktighet.

9.1.4. Sätter fogarna igen i dränerande beläggningar?

I Figur 9-4 jämförs infiltrationskapaciteterna vi tidigare räknat fram, med intensiteten för ett 50-årsregn och ett 100-årsregn som varar i 10 minuter.

Även för de allra intensivaste regnen kommer infiltrationskapaciteten alltså att vara mera en dubbelt så hög som behovet, även efter 8 - 12 år drift. Det betyder att för dessa förutsättningar kommer konstruktionen att klara sig bra efter 8–12 års drift.



Figur 9-4 Initiala infiltrationskapacitet och intensitet för 50- och 100-års regn jämfört med infiltrationskapaciteten efter 8–12 år. Man ser att kapaciteten efter 8–12 års drift överskrider med marginal dessa regn med marginal.

10. Resultat från Infiltrationsmätning

Mätning av infiltrationskapacitet har gjorts på två platser 1) Vara och 2) Campus Vellinge.

Vid fältmätning av infiltration användes dubbelringsmetoden där dimensionerna på det invändiga röret var ca 300 mm och på det yttre ca 600 mm. Rekommendationer enligt ASTM D5093-15 följdes [18].

Mätningen baseras på att kunna säkerställa ett "approximativt" laminärt, vertikalt flöde, där två aluminiumringar används. Dessa ringar tätas med tätningsmassa mot beläggningen för att förhindra läckage. Man uppmäter vattenförlusten i den inre ringen under en bestämd tid. Den yttre ringen fylls hela tiden med vatten på en konstant nivå under pågående tidsmätning för att vattnet som rinner ned i den inre ringen verkligen ska rinna vertikalt och inte ner och sedan åt sidan i konstruktionen. Vattenförlusten i den yttre ringen mäts ej, men säkerställer ett approximativt vertikalt flöde ifrån vattenförlusten i den inre ringen.

Resultatet av mätningarna är beroende av en rad olika faktorer vilket nödvändiggör att man repeterar mätningarna på flera platser. Påverkande faktorer kan vara partikelstorlek. Är det en markyta som ska mätas och den utgörs av material med större stenar, t ex som i ett förstärkningslager där de största stenarna kan vara upp till 100 mm, så påverkar förekomsten av dem resultatet signifikant. Idealiskt skulle den inre ringens diameter vara uppåt 8 gånger större än de största partiklarna. Ofta får man nöja sig med 3 ggr den största stenstorleken. Som kompensation utförs lämpligen fler mätningar, tills man ser att resultaten *stabiliserar* sig på en nivå. På samma sätt förhåller det sig med markstensbeläggningar där de öppna fogarna kan ha olika storlek och den totala öppna fogarean kan variera mycket mellan olika produkter. Även produktformaten kan skilja sig avsevärt åt. Detta innebär att det är ytterst viktigt att den yta dubbelringsinfiltrationsmetern omsluter är representativ för ytan i stort. Dvs att ytan innanför ringen motsvarar samma förhållande mellan permeabel/impermeabel area som ytan i stort. Vid osäkerhet om tillgänglig area för infiltration, kontakta leverantören. Vissa markstensprodukter har även av tekniska/estetiska skäl s k "falska fogar", dvs ej genomgående fog. Dessa fylls också med fogmaterial och ser ut som "vanliga" öppna fogar (se till exempel Figur 10-5). Man bör därför borsta ytan lätt för att kunna lokalisera optimala platser att mäta på.



Figur 10-1 Infiltrationsmätning med dubbelringsinfiltrrometer (Foto Björn Schouenborg).

10.1. Infiltrationsmätning i Vara

Ytan i Vara (Jem & Fix) beskrivs i mera detalj i avsnitt 8.4. Ingen tillrinning av nederbörd från andra intilliggande ytor sker, med andra ord sker infiltration endast av nederbörd som faller på ytan.

Tabell 10-1 sammanställer resultaten av infiltrationsmätning från Jem & Fix i Vara. Normalt används meter per sekund som enhet för hydraulisk konduktivitet. Men eftersom mätningen syftar till att undersöka beläggningen och konstruktionens förmåga att infiltrera nederbörd har meter per sekund konverterats till enheten för nederbördsintensitet, dvs millimeter per timme.

Infiltrationen mättes vid fem mätpunkter enligt Figur 10-2. Mätpunkterna korresponderar med mätpunkter för fallviktsmätningen (22m, 53m, 146m, 166m och 189m) enligt Figur 8-25. Ytan är belagd med dränerande marksten av typen Delta Drain (Benders) och har en fogarea tillgänglig för infiltration på ca 13,5 %. Beläggningen är gjord för mkt tung belastning och kan trafikeras tom trafikklass 4 (Figur 10-3).



FÖRKLARINGSTEXT

- FALLVIKTMÄTNING
- UNGEFÄRLIGT AVRINNINGSSOMRÅDE
- INFILTRATIONSTEST

Figur 10-2 Mätpunkter för fallviktmätning och infiltration i Vara (Illustration Edge).

Vid fyra av mätpunkterna uppmättes infiltrationsförmåga mellan ca 3 000 och 5 500 mm/h. Vid mätpunkt 22m uppmättes avsevärt högre infiltrationsförmåga, ca 13 000 mm/h. I samtliga mätningar överstiger kapaciteten avsevärt behovet av att kunna infiltrera ett 100-årsregn (varaktighet i 10 minuter) motsvarar intensiteten ca 175 mm/h enligt Figur 9-3. Det är mer än 17 ggr mer än behovet.

Ytan färdigställdes 2020 och hade vid mättillfället varit i drift under ca 2 år. Inga mätningar av infiltrationskapacitet utfördes vid färdigställande. Om man antar att igensättningen av ytan följer normal utveckling (enligt Figur 9-2), korresponderar 2 års användning av ytan till ca 45 till 60 % reduktion av infiltrationsförmågan jämfört med initial infiltrationskapacitet.

Vid ett motsvarande försök inom ramen VINNOVA-projektet "Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor" uppmättes initial (och innan trafikpåsläppt) infiltrationskapacitet på en i det närmaste identisk konstruktion till ca 11 500 till 15 000 mm/h [22]. I Vara ligger mätpunkt 22m väl skyddad från påverkan av växtlighet och annan förorening och det kan därför antas att infiltrationsförmågan efter två år (13 040 mm/h) i princip är oförändrat jämfört med den initiala. Resterande mätpunkter ligger mera oskyddat till. Med samma antagande om initial infiltrationskapacitet ligger mätningarna på, eller något lägre än, normalt förväntad igensättningstakt enligt Figur 9-2. Antagande om att infiltrationskapaciteten följer normal utveckling under svenska förhållanden enligt denna kurva kan endast verifieras med ytterligare uppföljning och mätningar, förslagsvis vart annat år. Det är också rimligt att platsens läge och utsatthet för nedsmutsning har en stor inverkan. Denna variation mellan olika platser behöver också verifieras med erfarenhet och uppföljande mätningar.



Figur 10-3 Dränerande marksten av typ Delta Drain (Benders) vid Jem & Fix i Vara (Foto Erik Simonsen).



Figur 10-4 Detalj av dränerande betongmarksten som används i Vara (Delta drain, Benders Foto: Benders AB).

Tabell 10-1 Resultat från infiltrationsmätningar i Vara.

Mät-punkt	Försök nr.	Medel-värde (liter)	Tid (s)	Vatten-flöde (l/s)	Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Hydraulisk konduktivitet (mm/h)
22m	1-1	5	72	0,0694	1,13E-03	4 062
22m	1-2	10	163	0,0613	9,97E-04	3 589
22m	2-1	5	102	0,0490	7,96E-04	2 867
22m	2-2	10	243	0,0412	6,69E-04	2 407
22m	3-1	5	95	0,0526	8,55E-04	3 079
22m	3-2	10	168	0,0595	9,67E-04	3 482
Medel					9,02E-04	3 248
53m	1-1	5	60	0,0833	3,08E-03	11 079
53m	1-2	10	68	0,1471	5,43E-03	19 550
53m	2-1	5	58	0,0862	3,18E-03	11 461
53m	2-2	10	132	0,0758	2,80E-03	10 071
Medel					3,62E-03	13 040
146m	1-1	5	51	0,0980	1,59E-03	5 735
146m	1-2	10	115	0,0870	1,41E-03	5 086
146m	2-1	5	50	0,1000	1,62E-03	5 849
146m	2-2	10	100	0,1000	1,62E-03	5 849
Medel					1,56E-03	5 630
166m	1-1	5	82	0,0610	9,91E-04	3 567
166m	1-2	10	148	0,0676	1,10E-03	3 952
166m	2-1	5	140	0,0357	5,80E-04	2 089
Medel					8,90E-04	3 203
189m	1-1	5	60	0,0833	1,35E-03	4 875
189m	1-2	10	120	0,0833	1,35E-03	4 875
189m	2-1	5	53	0,0943	1,53E-03	5 518
189m	2-2	10	123	0,0813	1,32E-03	4 756
Medel					1,39E-03	5 006

10.2. Infiltrationsmätning vid Campus Vellinge

Ytan vid Campus i Vellinge beskrivs i detalj i avsnitt 8.2. Tabell 10-2 sammanställer resultaten av infiltrationsmätningarna. Normalt används meter per sekund som enhet för hydraulisk konduktivitet. Men eftersom mätningen syftar till att undersöka beläggningen och konstruktionens förmåga att infiltrera nederbörd har meter per sekund även konverterats till enheten för nederbördsintensitet, dvs millimeter per timme.

Ytan är belagd med dränerande marksten av typen Benders Gräsarmering (Figur 10-5) som har en fogarea tillgänglig för infiltration på 18,4 %. Stenen är i första hand avsedd för armering av gräs men kan, om fogmaterialet byts till makadam i fraktionen 2/5, användas som infiltrerande beläggning upp till trafikklass 1a. Ytan har 790 m² tät hårdgjord yta som avleds till 525 m² dränerande beläggning.

Två mätningar genomfördes inom område 8 enligt Figur 10-6 och resultaten sammanfattas i Tabell 10-2. Ytan vid Campus i Vellinge var vid mättillfället ca 3 till 4 år gammal. Inga mätningar av infiltrationskapacitet utfördes vid färdigställande.

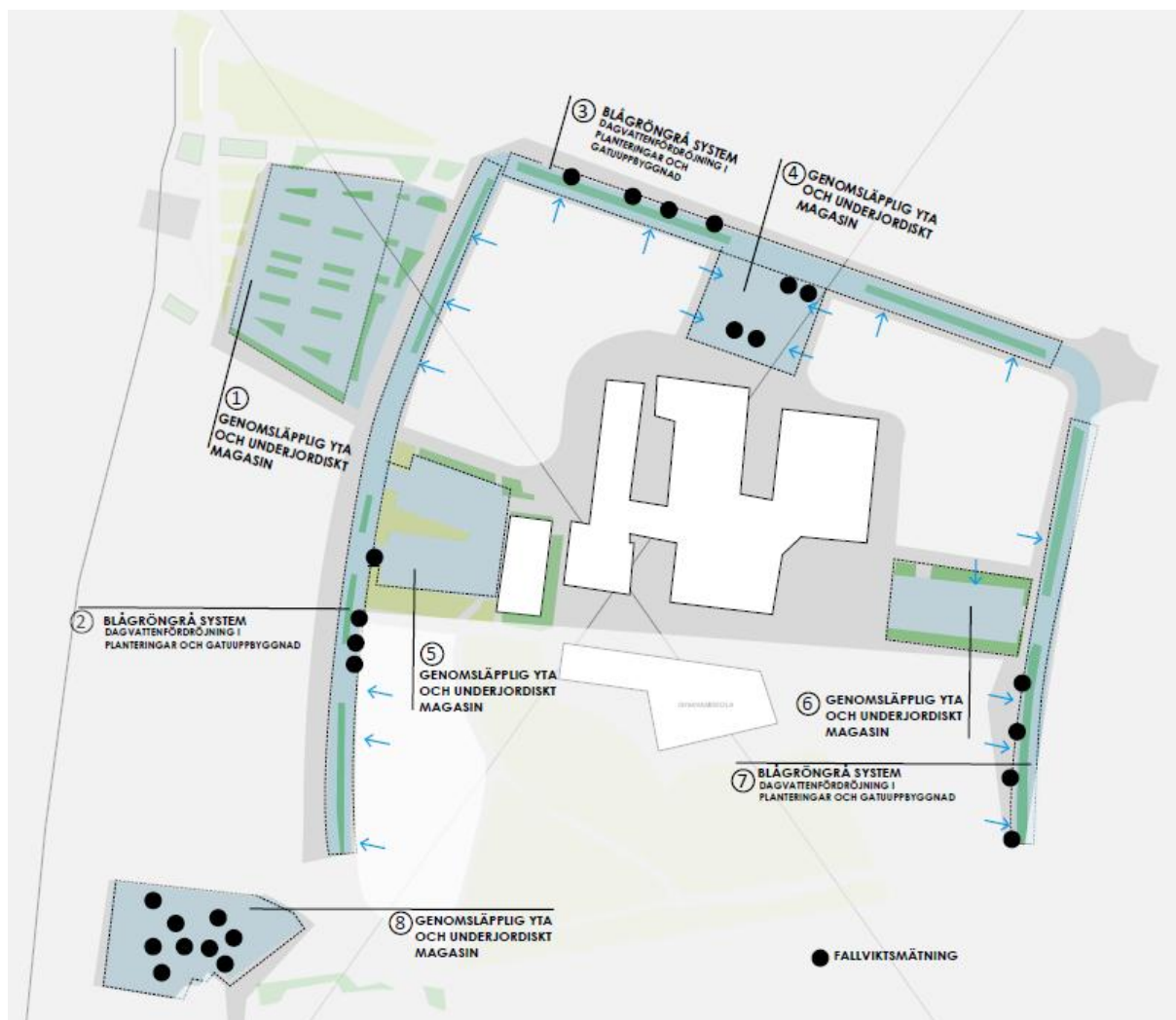
Med antagande om normal igensättningstakt av fogarna enligt Figur 9-2, är förväntad infiltration ca 28 till 42 % av den initiala. Den dränerande beläggningen ligger nära planteringar och annan vegetation och visuell inspektion visade relativt hög grad av ogräs i fogarna. Det är därför rimligt att anta att igensättningstakten är relativt hög och att infiltrationskapaciteten ligger nära det lägre förväntade värdet (ca 28 %). Aktuell infiltrationskapacitet ligger trots detta avsevärt över (som lägst ca 10 ggr) uppskattade behovet att kunna infiltrera tex ett 100-årsregn utan att vatten blir stående på ytan. Ett 100-årsregn med varaktighet i 10 minuter motsvarar intensiteten ca 175 mm/h enligt Figur 9-3.

Tabell 10-2 Resultat av infiltrationsmätning från Campus i Vellinge

Mätpunkt	Medelvärde (liter)	Tid (s)	Vattenflöde (l/s)	Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Hydraulisk konduktivitet (mm/h)
1	5	210	0,0238	4,73E-04	1 704
2	5	96	0,0521	1,16E-03	4 167
Medel				8,16E-4	2 935



Figur 10-5 Gräsarmeringssten Drain (Benders) från Campus i Vellinge (Foto: Benders AB).



Figur 10-6 Översikt över Campus i Vellinge. Svarta punkter anger position för fallviktsmätningar. Infiltrationsmätning gjordes på yta 8 (Illustration Edge).

11. Diskussion och slutsatser

Denna första uppföljning av BGG-konstruktioner (Blå-Grön-Grå) har gett värdefulla insikter om både bärighet och infiltrationskapacitet. Resultaten visar att BGG-system i praktiken fungerar väl jämfört med traditionella konstruktioner

Nedan sammanfattas resultaten från dessa första fallvikts- och infiltrationsmätningar.

11.1. Bärighet – fallviktsmätning

Fallviktsmätningar har utförts i flera kommuner för att undersöka bärigheten på BGG-konstruktioner med öppet förstärkningslager (Rosendal i Uppsala, Campus i Vellinge, Munka-Ljungby i Ängelholm och Jem och Fix i Vara).

- **Rosendal:** Ingen signifikant skillnad i ytmodul mellan BGG-konstruktioner med öppet förstärkningslager (22/90) och referenskonstruktioner med traditionellt förstärkningslagermaterial (0/90). Det är oklart om det bundna bärlaget ger ökad styvhet.
- **Campus i Vellinge:** Ingen signifikant skillnad i styvhet mellan öppna förstärkningslager och traditionella förstärkningslagermaterial. Högre ytmoduler uppmättes på referensytorna, vilket antas bero på högre styvhet från asfaltbeläggningen.
- **Munka-Ljungby:** Något lägre styvhet för öppna förstärkningslager jämfört med traditionella förstärkningslagermaterial. Detta kan bero på att materialet är relativt ensgraderat.
- **Vara:** Större variation mellan individuella mätpunkter. Ingen skillnad i bärighet mellan BGG-konstruktionerna och referensen med traditionell asfaltkonstruktion kunde detekteras.

Den största osäkerheten i resultaten från bärighets- och infiltrationsmätningarna verkar vara relaterad till följande faktorer:

- **Materialegenskaper:** Kunskapen om materialegenskaper för dränerande material är begränsad, vilket gör det svårt att exakt förutsäga deras beteende över tid.
- **Mätmetodens begränsningar:** Fallviktsmätningar förutsätter att skikten är kontinuerliga, homogena och elastiska, vilket inte alltid är fallet för markstensbeläggningar. Detta kan leda till felaktiga styvhetsvärden.
- **Tidsberoende faktorer:** Styvhetsmätningar ger inte nödvändigtvis en indikation på konstruktionens förväntade livslängd eftersom andra faktorer som stabilitet, nötning, fuktillstånd och temperatur också påverkar.
- **Variation i mätpunkter:** Det finns en stor variation mellan individuella mätpunkter, vilket kan bero på olika installationer under markytan eller ojämn packning av de obundna lagren.

Sammanfattningsvis kunde ingen signifikant skillnad i styvhet mellan öppna och traditionella förstärkningslager påvisas. Ytmodul, beräknat från fallviktsmätningar, är ett enkelt mått att beskriva konstruktionens bärighet. Det rekommenderas att följa upp samtliga ytor efter två år och förfina jämförelsen. Det kan göras genom att utveckla och i mer detaljerad studera data och deflektionsprofilerna från fallviktsmätningarna.

11.2. Infiltrationskapacitet

Mätning av infiltrationskapacitet har utförts på två konstruktioner, Campus i Vellinge och Jem och Fix i Vara.

- **Resultat:** Aktuell infiltrationskapacitet ligger avsevärt över behovet för att hantera ett 100-årsregn utan att vatten blir stående. Detta är ett mycket bra resultat.

- **Igensättning:** Antagande om att igensättningen följer normal utveckling visar att ytan i Vara kan förväntas ha en reduktion av infiltrationsförmågan på 45–60 % efter två år, medan Campus i Vellinge kan förväntas ha en reduktion på 28–42 %. Infiltrationskapaciteten minskar över tid på grund av igensättning av fogarna med smuts och partiklar. Hur mycket och hur snabbt detta sker beror på lokala förhållanden.
- **Mätmetodens begränsningar:** Resultaten från infiltrationsmätningar kan variera beroende på partikelstorlek, produktformat och fogarea. Det är viktigt att mätningarna utförs på representativa ytor.
- **Tidsberoende faktorer:** Förändringen av infiltrationskapaciteten över tid är baserad på antaganden om normal igensättningstakt, vilket kan variera beroende på lokala förhållanden och användning.

11.3. Rekommendationer framåt

En fortsatt uppföljning kommer att göras i en del 2 av denna rapport inom ramen för projekt.

[Byggnation, funktion och uppföljning av multifunktionella konstruktioner för klimatanpassning | Infra Sweden](#)

- Fortsatt uppföljning av både bärighet och infiltration bör genomföras regelbundet.
- Utveckling av metodik för att bättre tolka fallviktsdata i icke-homogena konstruktioner och koppla dessa till dimensionering tex med ERAPave.
- Förbättrad dokumentation av materialegenskaper och utförande vid byggnation.
- Utvärdering av drift- och underhållsstrategier för att säkerställa långsiktig funktion.

Referenser

- [1] AMA Anläggning 20. Svensk Byggtjänst
- [2] Avledning av dag-, drän- och spillvatten. Funktionskrav, hydraulisk dimensionering och utformning av allmänna avloppssystem. Svenskt Vatten AB. Publikation P110. ISSN 1651-4947 (2016).
- [3] Beläggning med plattor och marksten av betong, Projektanvisningar och rekommendationer. Tredje utgåvan (2019). ISBN 978-91-519-3476-1. Svenska Kommunförbundet och Svensk Markbetong (2019).
- [4] Design and construction of concrete block permeable pavements, edition 7. Interpave
- [5] (2018), L534:L217. Published by Interpave, www.paving.org.uk.
- [6] Forskning för ett transformativt och hållbart samhällsbyggande, Strategisk agenda för det nationella forskningsprogrammet för hållbart samhällsbyggande. FORMAS (2021).
- [7] Fördröjning av dagvatten med dränerande markstensbeläggning. PROJEKTERING, UTFÖRANDE SAMT DRIFT OCH UNDERHÅLL AV MULTIFUNKTIONELLA GATURUM. Svensk Markbetong (2019). <https://svenskmarkbetong.se/bocker/>
- [8] In-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement – New results. Dr Soenke Borgwardt (2015). In: International Conference on Concrete Block Pavements, ICCBP 2015.
- [9] Krav Bitumenbundna lager. TDOK 2013:0529. Trafikverket (2017).
- [10] Levande stadsrum-en handbok i Blågröngrå system, Version 3.1. Fridell, K. et. al. (2019). <https://bluegreengrey.edges.se/>
- [11] M. Mahdi Roozbahani, Rodrigo Borela and J. David Frost (2017). Pore Size Distribution in Granular Material Microstructure. MDPI Materials 10(11) 1237 <https://doi.org/10.3390/ma10111237> .
- [12] Mohammad Shafiqur Rahman, Sigurdur Erlingsson & Abubeker Ahmed (2022) Modelling the permanent deformation of unbound granular materials in pavements, Road Materials and Pavement Design, DOI: 10.1080/14680629.2022.2108883.
- [13] Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem. Svenskt Vatten AB. Publikation P104. ISSN 1651-4947 (2011).
- [14] Performance of Different Types of Permeable Concrete Block Pavements in Accelerated Testing, S. Rahman, E. Simonsen and F. Hellman. 12th International Conference on Concrete Block Pavement Oct. 16-19, 2018, Seoul, Korea.
- [15] Pervious Concrete, Reported by ACI Committee 522, ACI 522R-06 (2006).
- [16] Regnenveloppmetoden (1982). Sjöberg, A. et al. Chalmers Tekniska Högskola, Meddelande 64, ISSN 0347-8165.
- [17] SS EN 1338, Betongmarksten – Krav och provningsmetoder, SIS.

- [18] Standard test method for field measurements of infiltration rate using Double-Ring infiltrometer with sealed-inner ring. ASTM D5093 – 15.
- [19] Swedish Design Tables for Permeable Block Pavements. Shafiqur Rahman, Erik Simonsen and Fredrik Hellman, Vinnova – Utmaningsdriven innovation – Hållbara attraktiva städer (2017).
- [20] The SuDS Manual, CIRIA report C753 (2018). ISBN: 978-0-86017-760- 9.
www.ciria.org.
- [21] TRVKB 10 Obundna lager, Trafikverkets Krav Beskrivningstexter för obundna material i vägkonstruktioner, TRV 2011:083, TDOK 2011:265, Trafikverket (2011).
- [22] Uppmätt hydraulisk konduktivitet på olika krossmaterial i laboratorium och infiltrationsmätningar på vägkonstruktioner i fält med god vattendrainerande förmåga (2017). Magnus Döse och Björn Schouenborg. Vinnova – Utmaningsdriven innovation – Hållbara attraktiva städer. www.klimatsakradstad.se
- [23] Utvärdering av vägkonstruktioners bärighet med fallviktsapparat, TDOK 2019:0463, Trafikverket (2020).
- [24] Water permeable pavements in Belgium – from research project to real application. Anne Beeldens et al. (2009), In: 9th. International Conference on Concrete Block Paving (2009).
- [25] Water pervious pavement blocks: The Belgian Experience (2006). Anne Beelden and, Gontran Herrier. 8th International Conference on Concrete Block Paving, November 6-8, 2006 San Francisco, California USA.
- [26] Porous pavements – Integrative studies in water management and land development. ISBN 0-8493-2670-2. Ferguson, Bruce K. (2005).
- [27] Multifunktionella urbana dagvattenanläggningar – Referensanläggningar. Kent Fridell, Erik Simonsen, Fredrik Hellman och Björn Schouenborg. Projekt: Formas. Multifunktionella urbana dagvattenanläggningar [Rapport MUD - Referensanläggningar 20230125_0.pdf](#)
- [28] Obundna lager för vägkonstruktioner TDOK2013:530
<https://trvdokument.trafikverket.se/Versioner.aspx?spid=2829&dokumentId=TDOK%202013%3A0530>
- [29] SS-EN 13242 +A1:2007 Ballast för obundna och hydrauliskt bundna material till väg- och anläggningsbyggande

VTI är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut inom transportsektorn. Vi bedriver forskning och utveckling för att förbättra kunskapen om infrastruktur, trafik och transporter. Genom vårt arbete bidrar vi till att nå Sveriges transportpolitiska mål för tillgänglighet, säkerhet, miljö och hälsa.

Vi utför forskning på uppdrag inom alla transportslag och arbetar i en tvärvetenskaplig organisation. Den kunskap vi genererar ger viktig information till aktörer inom transportsektorn och används ofta direkt i nationell och internationell transportpolitik.

Utöver forskning erbjuder vi utredningar, rådgivning samt olika mät- och provningstjänster. På VTI har vi avancerad forskningsutrustning av olika slag och världsledande körsimulatorer. Vi har även ackrediterade laboratorier för vägmaterial och krocksäkerhetstestning.

Transportbiblioteket vid VTI är en nationell resurs som samlar in och sprider information om svensk transportforskning. Biblioteket ger stöd och vägledning till alla som söker information inom området vilket inkluderar lån- och kopieservice. Exempel på uppdrag är informationssökningar, handledning i referenshantering och skräddarsydd service till myndigheter och organisationer.

I Sverige samarbetar VTI med universitet och högskolor som bedriver relaterad forskning och utbildning. Vi deltar regelbundet i internationella forskningsprojekt, främst i Europa, och är aktiva inom internationella nätverk och allianser. Vi är cirka 240 medarbetare och finns i Linköping, Stockholm, Göteborg och Lund.

vti

Statens väg- och transportforskningsinstitut • www.vti.se • vti@vti.se • +46 (0)13-20 40 00