

Dimensionering, bärighet och infiltration

Uppföljning av Blå-Grön-Grå (BGG) konstruktioner



Akronym: MUD

Diarienummer: 2019-00175

Datum: 2022-11-21

Rapportansvarig: Fredrik Hellman, Erik Simonsen, Shafiqur Rahman, Magnus Döse och Björn Schouenborg

Projektoordinator: RISE

Omslagsbild: Fallviktsmätning på BGG yta vid Rosendal, Uppsala (Fredrik Hellman)

Innehållsförteckning

FÖRORD	5
KONTAKTUPPGIFTER TILL PROJEKTPARTNERS	6
SUMMARY	8
1. INLEDNING.....	9
2. BGG-KONSTRUKTIONER	10
2.1. Hur fungerar BGG-konstruktioner	10
2.1.1. Dränerande beläggning.....	10
2.1.2. Tät beläggning.....	12
2.2. Fördelar med BGG-konstruktioner	13
2.3. Materialegenskaper hos makadam	14
2.3.1. Hållrumshalt/porositet:	14
2.3.2. Permeabilitet:	15
2.3.3. Porstorlek:.....	15
2.4. BGG-konstruktioners bärighet.....	16
2.5. Krav på material till öppna konstruktioner.....	19
2.5.1. Fog- och sättmaterial	19
2.5.2. Obundet bär- och förstärkningslagermaterial	19
2.5.3. Bärlager av dränerande asfalt (ABD) eller asfaltgrus (Ag)	21
2.5.4. Dränerande markstensbeläggning.....	22
3. DIMENSIONERING AV KOMMUNALA APPLIKATIONER	23
3.1. Inledning	23
3.2. Dimensioneringsprocessen i kommunala sammanhang	24
3.2.1. Bärighetsdimensionering - Klimatpåverkan.....	24
3.2.2. Bärighetsdimensionering – trafikbelastning.....	25
3.2.3. Hydraulisk dimensionering	25
3.2.4. Konstruktionstekniska lösningar.....	25
3.2.5. Utförande.....	26
3.2.6. Drift och underhåll.....	27
3.2.7. Uppföljning	28
3.3. Tabelldimensionering – bärighet.....	29
3.3.1. Trafikklass	29
3.3.2. Klimatzon	31
3.3.3. Materialtyp i terrassen	31
3.4. ERAPave	32
3.5. Hur använder man ERAPave?	33
4. BÄRIGHETSMÄTNING MED FALLVIKT	37
4.1. Mätning med fallvikt.....	37
4.2. Hur kan resultaten tolkas och vad betyder de i praktiken?	38
4.3. Uppsala kommun - Rosendal.....	39
4.3.1. Resultat	41

4.4. Campus i Vellinge.....	46
4.4.1. Resultat	46
4.5. Ängelholms kommun - Munka Ljungby	52
4.5.1. Resultat	53
4.6. Vara.....	56
4.6.1. Resultat	56
5. INFILTRATIONSMÄTNING – DRÄNERANDE BELÄGGNINGAR	60
5.1. Inledning	60
5.2. Hur estimeras beläggnings infiltrationskapacitet?	61
5.2.1. Initial infiltrationskapacitet.....	61
5.2.2. Förändring av infiltrationskapacitet över tid	62
5.2.3. Intensitet för dimensionerande nederbörd.....	63
5.2.4. Sätter fogarna igen i dränerande beläggningar?	64
5.2.5. Avledning till dränerande ytor	65
5.3. Infiltrationsmätning med dubbelringsinfiltrometer	66
5.4. Vara.....	67
5.5. Campus i Vellinge.....	70
6. SAMMANFATTNING	73
6.1. Bärighet – fallviktsmätning.....	73
6.2. Infiltrationskapacitet	74
REFERENSER	75

FÖRORD

Denna rapport ingår som delmoment i projektet: ” Multifunktionella urbana dagvattenanläggningar”. Formas har delfinansierat projektet inom ramen för programmet: *Från forskning till praktik - metoder och verktyg*, med inriktning mot ” Kunskapsöverföring av forskningsresultat”.

Projektet baseras huvudsakligen på det av Vinnova finansierade UDI-projektet Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor. Se även www.klimatsakradstad.se

Målet har varit att snabba på implementeringshastigheten av de resultat/leverabler Vinnovaprojektet genererade. Detta har framför allt skett genom kunskapsinformation men även uppföljning av piloter och andra aktiviteter/resultat inom det tidigare projektet.

Rapporten fokuserar på uppföljning av dimensionering, bärighet och infiltrationsegenskaper i fält.

Rapporteringen av detta projekt återfinns i följande rapporter om:

Dimensionering, bärighet och infiltration - Uppföljning av Blå-Grön-Grå (BGG) konstruktioner

Multifunktionella urbana dagvattenanläggningar – Referensanläggningar

Utbildnings- och kommunikationsaktiviteter

Samt en mer sammanfattande slutrapport.

Se dessutom följande länk till projektets hemsida för mer information:

Hemsida: www.klimatsakradstad.se

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

Cementa AB/Svensk Markbetong: Erik Simonsen

AB Anders Junghage: Anders Junghage

Vi tackar Formas för det finansiella bidraget och samarbetet under projektet samt alla personer från kommuner/städer som bidrag i väldigt många olika former och möjliggjort projektet.

KONTAKTUPPGIFTER TILL PROJEKTPARTNERS

Björn Schouenborg

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

Mail: 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 där utöver en magisterexamen med inriktning mot hydrogeologi och geoteknik från SLU.

Mail: kent.fridell@edges.se

Webbadress: www.edges.se



Martin Vysoky

Martin Vysoký är landskapsarkitekt och jobbar på Edge i Malmö. I sitt arbete fokuserar han på utformning av multifunktionella platser i offentliga rum som stärker kvaliteten och kontinuiteten av allt liv. Han har kompetens inom utformning av Blågröngrå system och har bidragit inom utveckling av handboken *Levande stadsrum*.

Mail: martin.vysoky@edges.se

Webbadress: www.edges.se



Erik Simonsen

Erik Simonsen är senior utvecklingsledare på Cementa AB 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 mera än 25 års erfarenhet av vägkonstruktion för kommunala applikationer, både med asfalt- och betongbeläggningar.

Mail: erik.simonsen@cementa.se

Webbadress: www.cementa.se

www.svenskmarkbetong.se



Fredrik Hellman

Seniorforskare på VTI på avdelningen Väg och Banteknik. Dr 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. Dr 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 betongstenskoder i AMA 23 och koderna för de öppna förstärkningslagren. Han har tillsammans med Erik Simonsen skrivit handboken "Dränerande markstensbeläggningar".

Mail: anders@junghage.nu

Webbadress: www.junghage.nu



SUMMARY

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

In urban areas, a large part of surfaces are impervious resulting in reduced natural possibility for rain fall infiltration. As cities become denser, more and more water is directed into the stormwater system. When it becomes full, water is pushed back up to the surface. And in case of more intense rain the worst case scenario is flooding, water-filled basements, damage to surrounding buildings and a lot of other negative consequences that are more difficult to quantify.

In Sweden, over 60 million metric tons of crushed rock material is used for roads construction per year. That's more than 40 million cubic meters of material, or almost 70 filled Globen Arena (Avicii Arena). Most of the material is used for traditional dense pavement structures that intensify the problems and increase runoff.

One way to reduce the risk of flooding, simplify the handling of stormwater and to provide good conditions for vegetation is to use BGG (Blue-Green-Grey) constructions. Common to these is a sub-base layer with a large proportion of voids, which means that stormwater can infiltrate and be stored in the road construction. The open sub-baselaye layer also improves the growing conditions for vegetation.

BGG constructions have been developed and tested in two previous Vinnova projects: "Grå-gröna systemlösningar för hållbara städer" and its continuation 2) "Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor". The results from these projects can be found at www.klimatsakradstad.se and demonstrate that with correct pavement design and execution, these structures provide the same bearing capacity as traditional dense pavement structures. BGG constructions can be used on low-traffic areas, pedestrian-bicycle paths, parking lots and square areas.

This project has investigated bearing capacity using falling weight deflectometry and infiltration capacity measurements on four different locations, Uppsala Rosendal, Ängelholm (Munka Ljungby), Vellinge and Vara to verify the function and performance of the structures. The report also contains a description of how the pavement design tool ERAPave can be used for design of BGG structures.

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 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 ytorna täta och regnvatten har ingen naturlig infiltrationsmöjlighet. Problemet är att när städerna förtätas och infiltrationsytor försvinner så leds mer och mer vatten ner i dagvattensystemet. När det blir fullt trycks vatten tillbaka upp till ytan. Och vid intensivare regn blir resultatet i värsta fall översvämningar, vattenfyllda källare, skador på kringliggande byggnader och många andra negativa konsekvenser som i dagsläget är betydligt svårare att kvantifiera.

I Sverige används över 60 miljoner ton bergmaterial till vägar, gator och torgytor per år. Det är mer än 40 miljoner kubikmeter material, eller nästan 70 st fyllda Globen. Den absoluta majoriteten av materialet används till täta konstruktioner som förvärrar problemen och ökar avrinningen.

Ett sätt att minska risken för översvämningar, förenkla hanteringen av dagvatten samt att tillgodose goda betingelser för växtlighet är att använda BGG (Blå-Grön-Grå)-konstruktioner. Gemensamt för dessa är att de förstärkningslager med stor hålrumsandel som medför att dagvatten kan infiltrera och magasineras i vägkonstruktionen. Det öppna förstärkningslagret förbättrar även livsbetingelserna för växtlighet.

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.

Detta projekt har följt upp bärighet med fallvikt och dräneringsförmåga på redan byggda ytor från fyra olika platser, Uppsala Rosendal, Ängelholm (Munka Ljungby), Vellinge och Vara för att verifiera konstruktionernas funktion och prestanda. Rapporten innehåller beskrivning av hur dimensioneringsverktyget ERAPAVE kan användas för dimensionering av dessa dränerande konstruktioner.

2. BGG-KONSTRUKTIONER

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.

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 t.ex. 4/90, 16/90, 22/90, 32/64 eller 32/90. Lokal tillgång beror i första hand på tillverkarens massbalans och kundefterfråga.

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).

Denna rapport fokuserar på BGG-konstruktioner med hårdgjord beläggning avsedda för trafikbelastning.

2.1. Hur fungerar BGG-konstruktioner

I BGG-konstruktioner med hårdgjord yta infiltreras dagvatten antingen via dränerande beläggning eller via brunnar eller sidointag. Vattnet magasineras temporärt i vägkonstruktionen (förstärkningslagret) och transporteras sedan vidare antingen lokalt ner i marken, via dagvattensystemet eller vidare till andra komponenter av BGG-systemet.

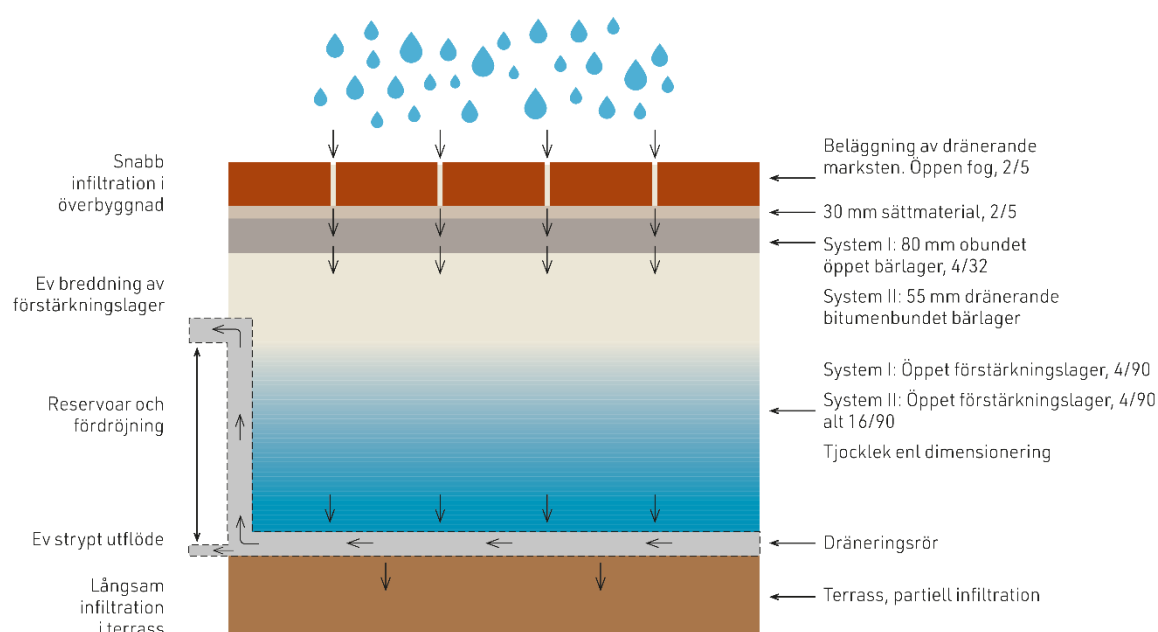
2.1.1. Dränerande beläggning

Om infiltration sker via beläggningen används normalt dränerande markstensbeläggning. 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 beläggningen. I båda konstruktionerna infiltreras regn genom markstensbeläggningen 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 exfiltreras 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 och flödesregulatorer är dimensionerat. 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 oss stora möjligheter att kontrollera fördröjnings- och tömningstid. Eftersom infiltrationen sker över hela beläggningens 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.

Infiltrationen sker genom fogen eller perkolationsöppningar i beläggningen. Tillgänglig area för infiltration är normalt större än 12 procent av beläggningsarean. Fogmaterialet utgörs av makadam i sorteringen 2/5. Större fogarea ger initialt något högre infiltrationskapacitet men ger samtidigt lägre lastspridande 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. Ytavrinning sker bara om nederbördens intensitet överskrider beläggningens infiltrationsförmåga eller om magasinet är underdimensionerat.



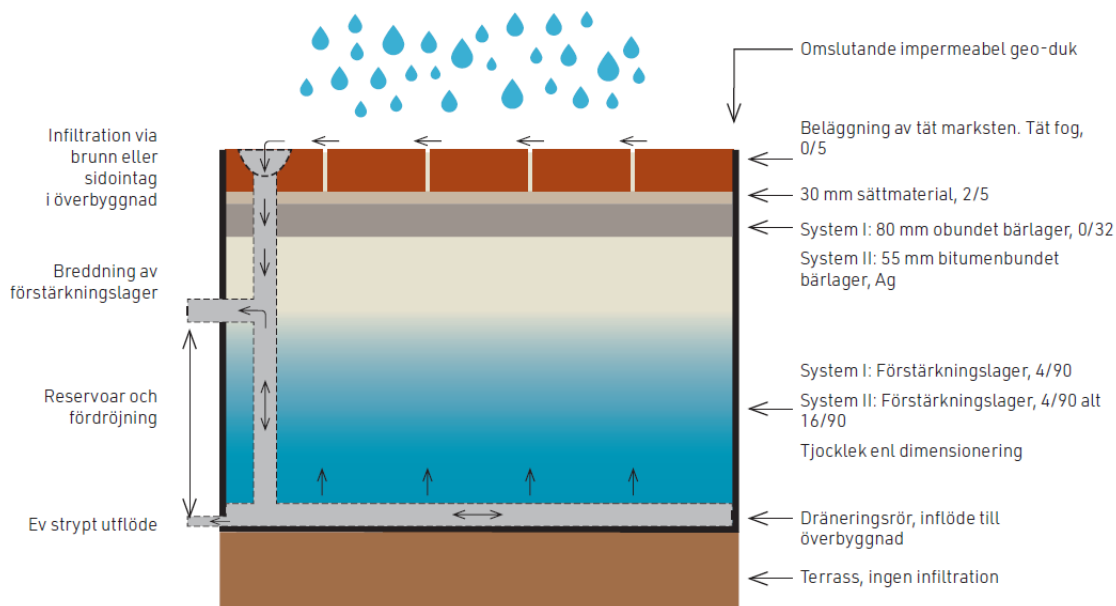
Figur 2-2 Dränerande markstensbeläggning (Delta Drain) med 13 procent area tillgänglig för infiltration.

2.1.2. 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 användas. Detta ger möjlighet för högre 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 geotekstil 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. Totalhalten av föroreningarna förblir den samma, men koncentrationen ökar och överbyggnadens förmåga att bryta ned dessa kan då minska.



Figur 2-3 BGG-konstruktion med tät beläggning och infiltration via brunnar

2.2. Fördelar med BGG-konstruktioner

Traditionell byggteknik medför en enkel och billig konstruktion, men samtidigt utgör den enorma volymen 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 naturligt nog begränsad. 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. Internationell forskning har visat på många miljömässiga och ekonomiska fördelar, såsom:

- Utjämning 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.
- Elimineras 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 perkolera 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, båda organiska och oorganiska kemikalier, utsätts för nedbrytning (biodegradering) av enzymer genom mikroorganismers aktivitet.

2.3. Materialegenskaper hos makadam

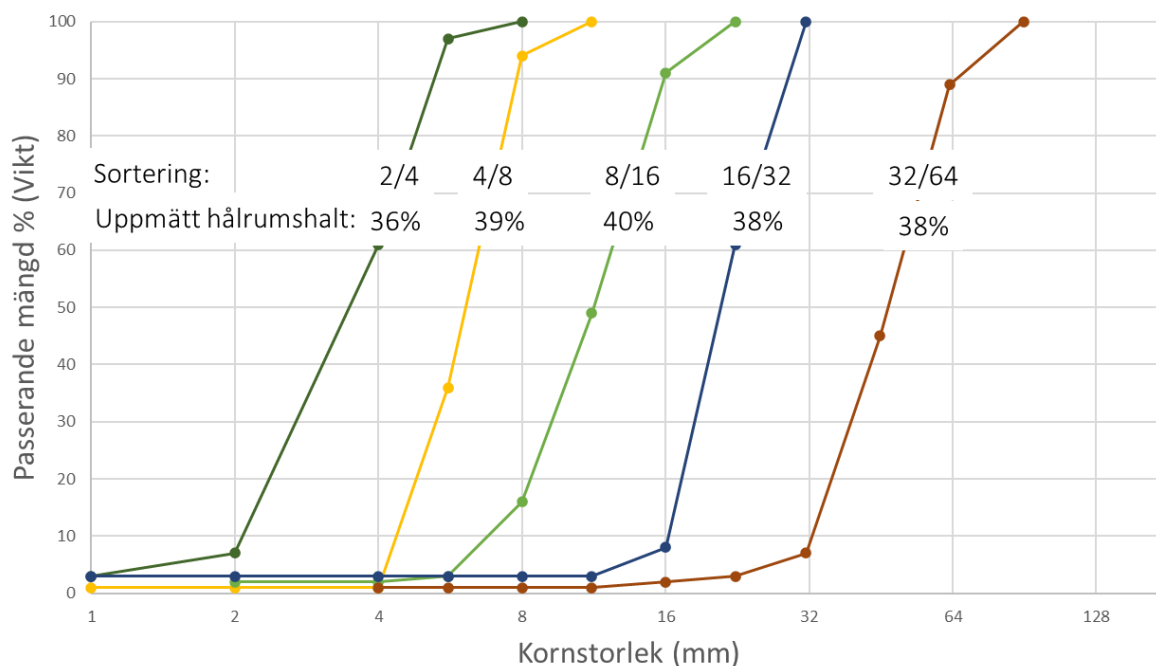
BGG-systemens övergripande egenskaper beror på flera faktorer t.ex. hur systemet är sammankopplat, hur vatten tas in i konstruktionen hur eventuella rörledningar är dimensionerade, hur drift och underhåll genomförs osv. Tre grundläggande materialegenskaper hos förstärkningslagret är dock avgörande för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

2.3.1. 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, med 50 cm förstärkningslager, motsvarar det 2 000 liter vatten per löpmeter gata!

Som tumregel ökar hålrums halten när kvoten mellan största och minsta stenstorlek minskar, t.ex. har 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 ensgraderat makadam, t.ex. 8/16, 16/32 och 32/64 osv, skiljer sig inte hålrums halten nämnvärt mellan olika sorteringar 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 (Ferguson (2005)).



Figur 2-4 Kornstorleksfördelning och hålrumsalter för olika makadam

2.3.2. Permeabilitet:

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

Permeabiliteten hos 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. Hålrums halt/porositet är endast en indirekt indikator på högre permeabilitet och mängd samt storlek på materialets underkorn är direkt avgörande.

2.3.3. 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 (Ferguson (2005), Roozbahan (2017)).

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

2.4. 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 (t.ex. spårdjup), kravnivå (t.ex. max spårdjup) och mätmetodik (t.ex. 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 i 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, t.ex. materialegenskaper (t.ex. styvhet), utförande (t.ex. packningsarbete), väder och klimat (t.ex. nederbörd, tjäle och tjällossning) samt drift och underhåll (t.ex. 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 upp i konstruktionen och manifestera sig som spår eller andra deformationer på ytan.

Till skillnad från traditionella konstruktioner har BGG-konstruktioner förstärkningslager 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.

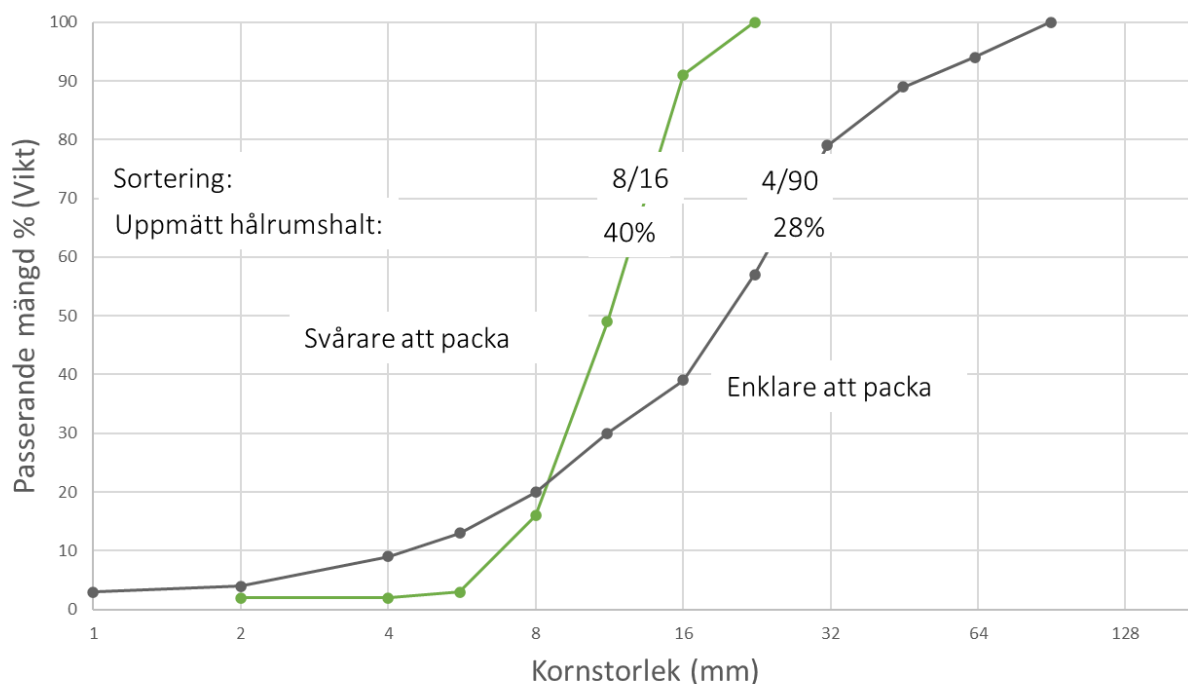
Däremot upplevs makadam som mera svårpackat än samkross och ett lyckat packningsresultat är viktigt för bärighet och tillståndsutveckling. Huvudsyftet med packningen är att öka materialets

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 2-6) är därför något mera svårpackat än material med en mera lutande siktkurva (4/90).



Figur 2-5 Att packningen utförs korrekt är av yttersta vikt för ett gott resultat.

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 2-6 Kornkurvan påverkar materialets packningsegenskaper

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 spår djupet! Tillskottet till spårutvecklingen, orsakat av närvaron av vatten, kan estimeras till mindre än 5 procent av total spårbildning 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. Däremot genom att välja ett material med något lägre hålrums halt och flackare siktcurva kommer packningsarbetet underlättas och risken för deformationer i materialet att reduceras.

2.5. 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. Om bärlagret består av obundet 0/32 används traditionellt sättlagermaterial enligt AMA Anläggning.

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).

2.5.1. 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 2-1 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. Samtliga referensvärden för överbyggnadsmaterial sammanfattas i tabell 5.2.

Tabell 2-1 Kornstorleksfördelning för fog- och sättmaterial

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

2.5.2. 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.

Kornstorleksfördelning ska deklarerar enligt 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 2-4 och kornstorleksfördelning ges av Tabell 2-1. 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.

Tabell 2-2 Kornstorleksfördelning för obundet bärlager av makadam

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 35 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.

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 för 4/32 och 4/90. Materialet ska inte vara tvättat.

Referensvärden för obundet förstärkningslagermaterial ges av Tabell 2-4 och kornstorleksfördelning ges av Tabell 2-3.

Tabell 2-3 Kornstorleksfördelning för obundet förstärkningslager av makadam 4/90

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 2-4 Referensvärden för obundna överbyggnadsmaterial (efter Svensk Markbetong (2019))

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 ⁽⁹⁾	10 %	-	10 %	-
LA ⁽⁴⁾	⁽⁷⁾		⁽⁷⁾	< 20 ⁽⁶⁾
M _{DE} ⁽⁵⁾	⁽⁷⁾		⁽⁷⁾	< 15 ⁽⁶⁾
Bärighet vid statisk plattbelastning Ev ₂ ^{(7), (8)}	> 140 MPa			-

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

(2) Enligt SS-EN 13242 och AMA Anläggning 20 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) Motstånd mot fragmentering uppmätt med Los Angeles metoden enligt SS-EN 13242.

(5) Krav på nötningssegenskaper enligt SS-EN 13242 uppmätt med micro-Deval metoden.

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

(7) Värden enligt Trafikverkets krav (TRVKB 10 Obundna lager, TDOK 2013:0530 Obundna lager för vägkonstruktioner.).

(8) Uppmärksamhet bör fästas vid att det oftast krävs fler överfarter än vad AMA anger för att säkerställa god komprimering.

(9) 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.

2.5.3. Bärlager av dränerande asfalt (ABD) eller asfaltgrus (Ag)

För tungt belastade ytor kan BGG-system utföras med bitumenbunda bärlager. Om infiltration sker genom ytan (t.ex. dränerande markstensbeläggning) används dränerande bitumenbundet material (till exempel ABD) 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". Slutlig specifikation för bitumenbundet dränerande bärlager bör arbetas fram gemensamt med lämplig asfaltstilverkare.

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.

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 hålrums halt upp till 35 procent, på grund av sin mycket höga bärighet (ACI 2006). 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". Ytterligare materialkrav beskrivs i detalj i "Fördröjning av dagvatten med dränerande markstensbeläggning", Svensk Markbetong (2019).

2.5.4. Dränerande markstensbeläggning

Dränerande markstensbeläggning kan tekniskt 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 den 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 (se vidare avsnitt 5).

Enligt brittiska byggnadsregler sätts minimum infiltrationskapacitet för ny beläggning till 2 500 mm/h (Interpave (2018), The SuDS Manual (2018)). 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 2.5.1 resulterar dock normalt till en infiltrationskapacitet för beläggningen som väl överstiger 2 500 mm/h. Inom projektet "Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor" uppmättes beläggningarnas infiltrationskapacitet till mellan 10 000 – 15 000 mm/h (Döse och Schouenborg (2017)). Även vid mycket kraftig igensättning och bristande underhåll kommer fogarnas dräneringsförmåga väl motsvara dimensionerande nederbördsintensitet (se vidare avsnitt 5).

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

3. DIMENSIONERING AV KOMMUNALA APPLIKATIONER

3.1. Inledning

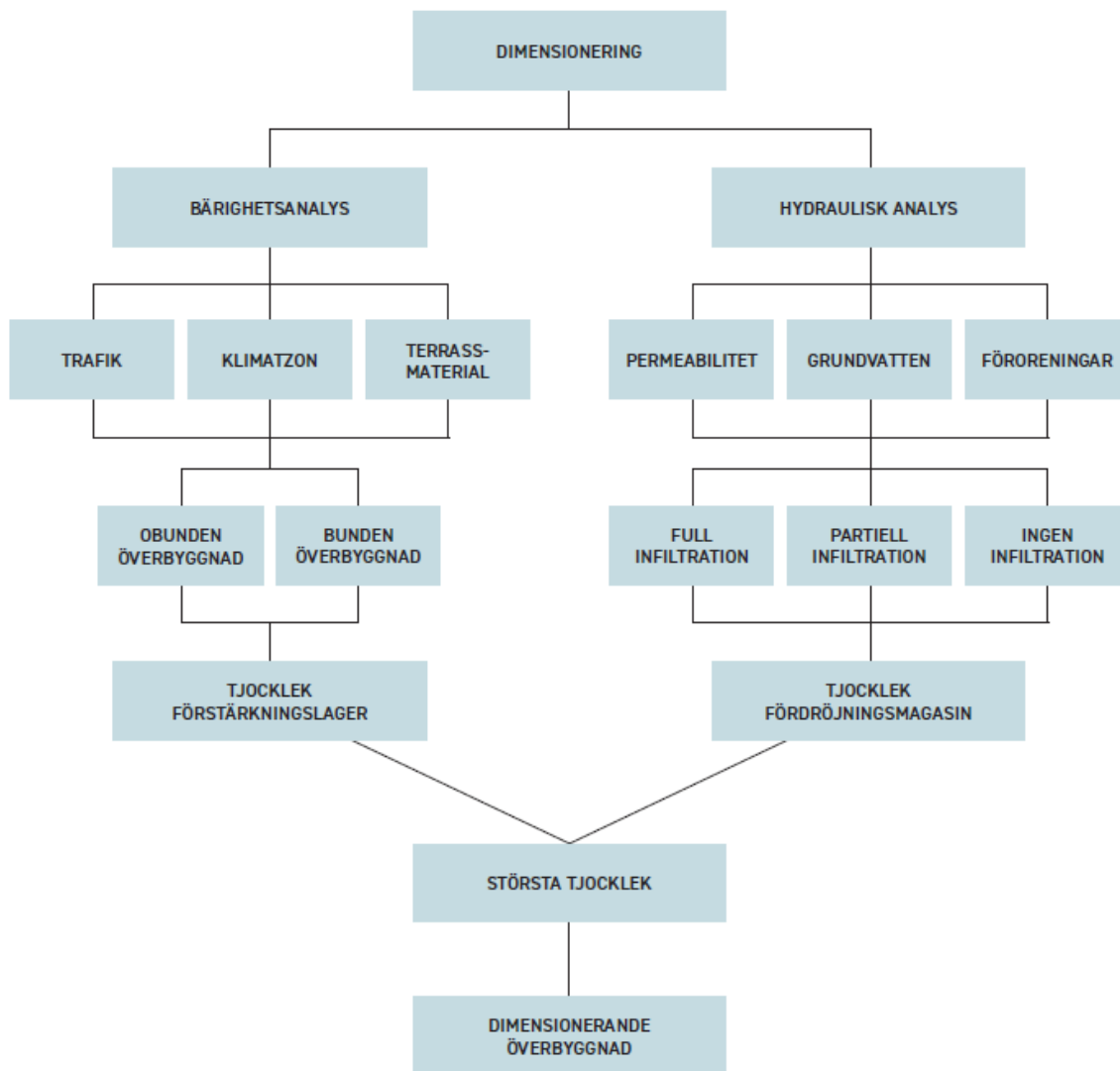
BGG-konstruktioner har i princip tre huvudsakliga tekniska funktioner:

1. Omhändertagande, fördröjning och exfiltrering 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 oreflekterat 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).



Figur 3-1 Flödesschema för bärlighets- och hydraulisk dimensionering av dränerande markstenskonstruktioner.

3.2. Dimensioneringsprocessen i kommunala sammanhang

För kommunala applikationer innebär dimensioneringsprocessen långt flera moment än att etablera korrekt förstärkningslagertjocklek med avseende på bärlighet och magasineringskapacitet. De olika steg i processen kan sammanfattas enligt nedan. Viktigt att notera att acceptabel tillståndsutveckling i beläggning och konstruktion förutsätter efterlevnad i samtliga moment! Inga moment är utbytbara eller kan kompenseras för!

3.2.1. Bärlighetsdimensionering - 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 sk tabelldimensionering, se vidare avsnitt 3.3

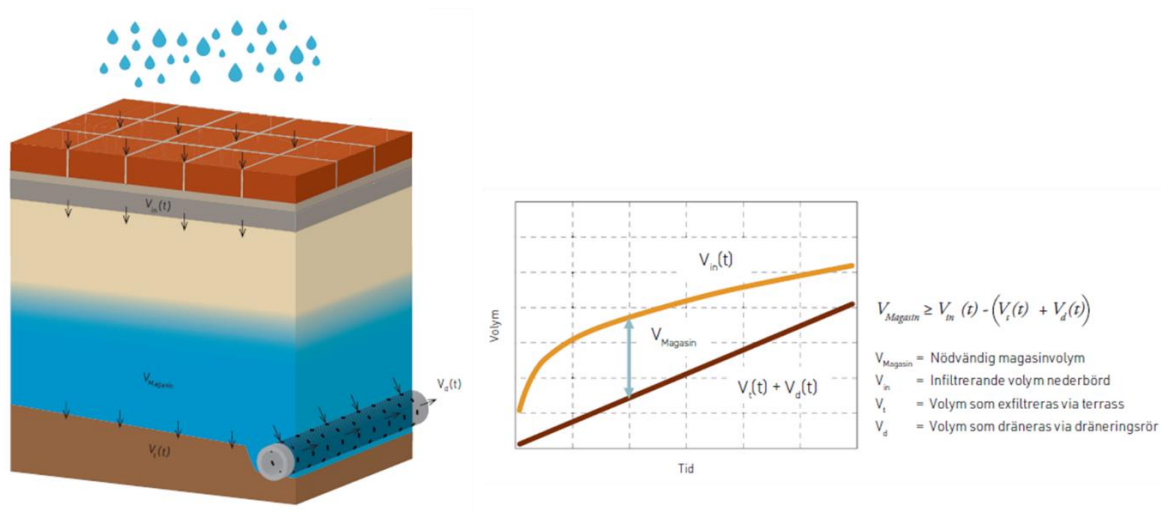
3.2.2. Bärighetsdimensionering – trafikbelastning

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 liten 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, se vidare avsnitt 3.3. För en fullständig beskrivning av dimensioneringsprocessen för öppna konstruktioner hänvisas till "Fördröjning av dagvatten med dränerande markstensbeläggning", Svensk Markbetong (2019).

3.2.3. 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 tomt inom 24 timmar efter dimensionerande regn, med undantag för eventuell bevattningszon (Levande stadsrum (2019).

Figur 3-2 illustrerar nödvändigt magasin för fördröjning av dagvatten. Magasinsvolymen måste vara större än infiltrerande mängd vatten minus vatten som exfiltreras 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).



Figur 3-2 Illustration av nödvändig magasinvolym för fördröjning av infiltrerande vatten

3.2.4. 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; inspänning, 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 t.ex. AMA Anläggning20 och Beläggning med plattor och marksten av betong (2019).



Figur 3-3 Exempel från bussgata utan inspänning. Förlust av fogmaterial har inte åtgärdats och fogförskjutning uppstår.

3.2.5. 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 3-4 Använd helst maskiner med larvfötter. Här utläggning av öppet bärlager över öppet förstärkningslager vid Jem & Fix, Vara

3.2.6. 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 följande:

- 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 och utförs.
- 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/sättmaterial
- Halkbekämpning med salt kan utföras. Tänk på att salt infiltreras tillsammans med dagvattnet och närhet till eventuella vattentäcker 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 hälla 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 dubbelringsinfiltrationsmeter, se vidare avsnitt 5.

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.

3.2.7. 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 (Formas (2019)). 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 hållet 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

antagande 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.

Förändringar i 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.

3.3. 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

3.3.1. Trafikklass

De två första är ganska enkla att ta reda på. Men trafikklassen upplever många är svår att räkna ut. Så man höftar eller uppskattar trafikklassen, sedan tar man till lite extra för att vara på säkra sidan. Resultatet är att du "bakar in" en godtycklig säkerhetsfaktor i beräkningen som sedan blir osynlig i resten av projekteringen. Och säkerhetsfaktorer som inte syns kan heller inte bedömas.

Att välja högre trafikklass än nödvändigt kan också få olika negativa effekter beroende på t ex materialtyp i terrassen. Dessutom är det negativt för ekonomin och miljön, eftersom det kostar mer och har en större 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.

Du bestämmer vilken trafikklass en vägsträcka har genom att göra en trafikklassanalys, för att uppskatta hur många tunga och lätta fordon som trafikerar vägsträckan. Sedan räknar du om trafikbelastningen 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 du vet hur många standardaxlar en väg

behöver tåla, så är det enkelt att titta i t ex Figur 3-5 för att avgöra hur vägen kan dimensioneras och konstrueras.

Om du bedömer att trafikbelastning blir drygt 50 000 standardaxlar (trafikklass 1a) dimensioneras ytan för att klara upp till 250 000 standardaxlar. Men inte mera! För 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). Alla leverantörer trafikklassar sina produkter. Kontakta din leverantör om du är tveksam!

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
----------	---------------------------	-------------

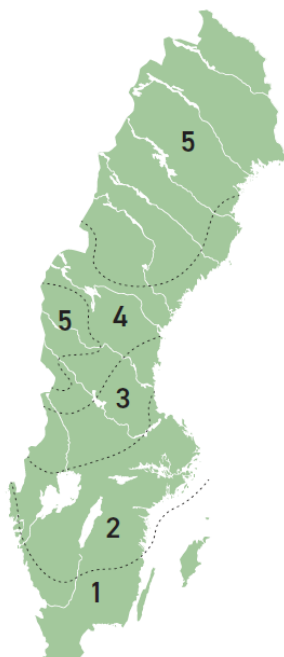
(1) Per körfält

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

Figur 3-5 Indelning i trafikklasser

3.3.2. Klimatzon

Ett objekts klimatzon hittar du på en klimatzonskarta (Figur 3-6). I varje klimatzon är de materialtekniska egenskaperna kring 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.



Figur 3-6 Indelning av Sverige i klimatzoner

3.3.3. 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 beställer du en jordartskarta från SGU (Sveriges Geologiska Undersökning), eller så beställer du en grundundersökning från ett konsultbolag. En grundundersökning är vardagsmat för de flesta konsultbolag och tar inte särskilt mycket tid. Fördelen är att den ger dig exakta uppgift om materialen i hela väglinjen.

När aktuell klimatzon, materialtyp i terrassen och trafikklass för ytan är känt kan konstruktionen "beräknas". Figur 3-7 illustrerar hur tabelldimensioneringen går till (efter Svensk Markbetong (2019)).

Känt:

Trafikklass = 2

Materialtyp i terrass = 3

Förstärkningslager = 290

Bärlager = 80

Sättlager = 30

Sten = 80

Total ÖB-tjocklek = 480 mm

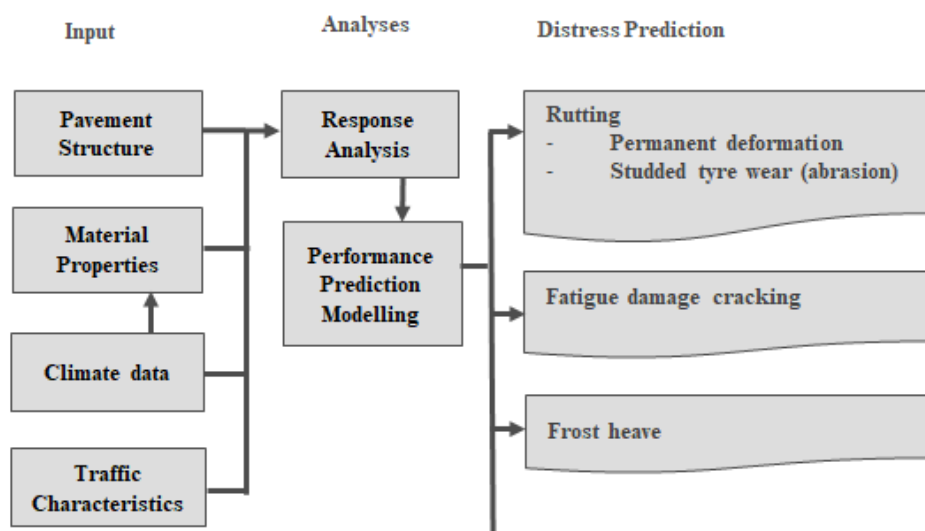
Klimatzon 1-5, krossat material i förstärkningslagret									
Trafik	Tillåtet antal standardaxlar	0	0	< 50 000	50 000 - 250 000	250 000 - 500 000	500 000 - 1 000 000	1 000 000 - 2 500 000	2 500 000 - 5 000 000
	Trafikklass	G	GC	0	1a	1b	2	3	4
Överbyggnad	Tjocklek (mm)								
	Marksten ⁽¹⁾	40	50	60	80	80	80	80	80
	Sättlager	30	30	30	30	30	30	30	30
	Obundet bärlager	Hela ÖB	80	80	80	80	80	80	80
	Förstärkningslagertjocklek (h _r) på terrass av materialtyp 1-5 ⁽²⁾	1	0	0	0	70	70	140	190
		2	0	70	110	110	150	200	290
		3	80	70	120	150	240	290	350
		4	100	70	120	160	270	330	410
		5	140	170	220	270	400	460	580

Figur 3-7 Exempel på tabelldimensionering (för traditionella markstenskonstruktioner)

3.4. ERAPave

ERAPave (Elastic Response Analysis of pavements) 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 (Rahman et al 2018).

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 vägkonstruktionen egenskaper och livslängd baserat på både trafikmängd och årstidsvariationer. Det är också möjligt att se effekter av olika klimatscenarier som t.ex. om vägkonstruktionen blir utsatt för extrema temperaturer och fuktighet under olika perioder.



Figur 3-8 Beräkningsflöde i ERAPave

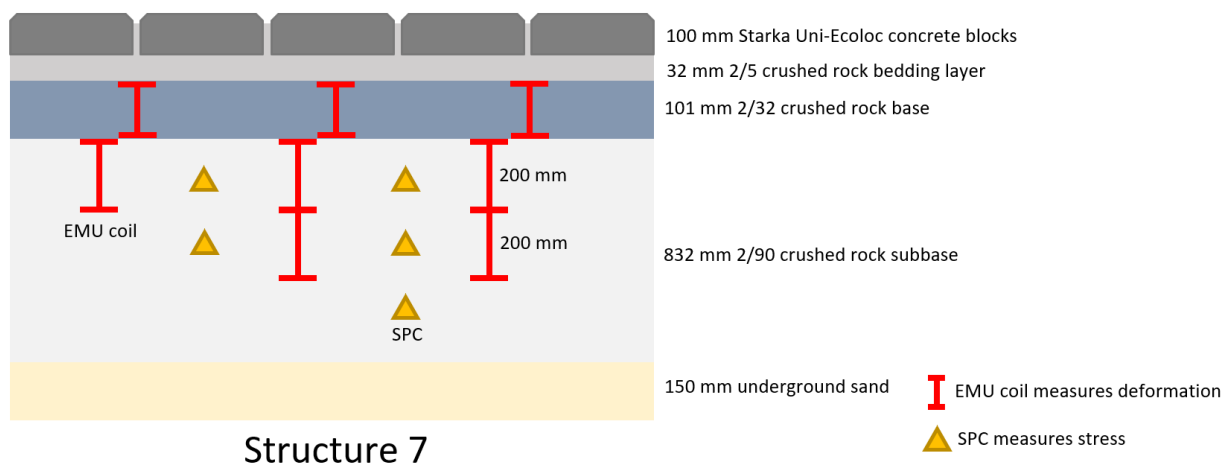
3.5. Hur använder man ERAPave?

I detta projekt har beräkningsprogrammet ERAPave använts på marstensbeläggningar med öppna förstärkningslager dvs de har en hög 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 www.vti.se.

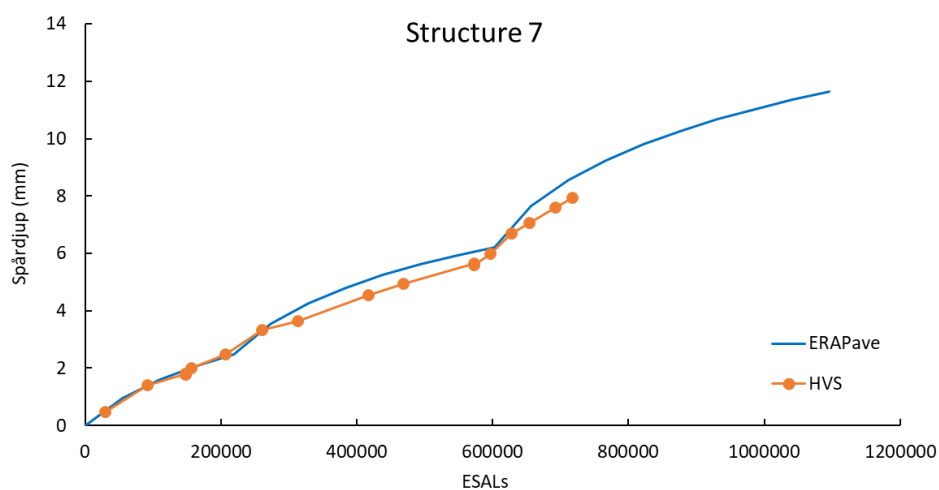
För att designa en beläggning i ERAPave behöver användaren välja en preliminär konstruktion bestående av olika typer av lager såsom asfalt, marksten, obundna berg- och terrassmaterial. Användaren behöver också mata in styvhetsparametrarna för dessa lager.

Tjockleken på de olika lagren justeras för att uppnå ett max spår djup för en viss trafikbelastning och klimatförhållanden. ERAPave är flexibel för användaren att välja lagertyper. Även om den i första hand är utvecklad för flexibla (asfalts) ytbeläggningar går det att använda 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 materialegenskaperna rätt. Målet här var att skapa en riktlinje för användaren att bestämma materialegenskaperna som vanligtvis används för betongmarksten.

Tillämpningen av ERAPave för marksten gjordes först med hjälp av testdata från fordonssimulatorer (HVS- Heavy Vehicle Simulator). I tidigare forskningsprojekt har flera markstenskonstruktioner testats i HVS:en och resultat från 10 konstruktioner kunde användas (Rahman et al 2017). Exakta lagertjocklekar, fuktförhållanden och spår djupsutveckling från bestämda axelbelastningar var kända från testerna. De materialegenskaper 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 materialegenskaperna justeras tills det beräknade spår djupet i ERAPave matchar det som uppmäts i HVS-testerna. Ett exempel på kurvanpassningen visas i Figur 3-9 och Tabell 3-1. Detta gjordes på alla tio teststrukturer 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 3-1. Antagandet var att om dessa värdeintervall fungerar för dessa tio strukturer kommer de att fungera för andra liknande konstruktioner också.



Figur 3-9 Exempel på en konstruktion som testats i HVS:en



Figur 3-10 Exempel på spårdjupsutveckling beräknat från ERAPave jämfört med resultat från HVS:en (ESALs motsvarar antal överfarter med standardaxlar).

Tabell 3-1 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 ¹ a	Konstant ¹ b	Styvhetsmodul (MPa)	Konstant ¹ a	Konstant ¹ b
Marksten av betong inklusive sättlager 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	Siltigsand	80	20	500	40	40	650
1. Parametrarna a och b är regressionskoefficienter för respektive materialtyp, och som används av ERAPave för beräkning av permanent deformation (spårdjup). 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.							

I Tabell 3-1 kan en användare uppskatta materialegenskaperna och designa en markstenkonstruktion för önskad förhållanden och prestandakriterier såsom spårdjup och trafikbelastning. Arbetet är under utveckling och kommer efterhand att förfinas och utökas Tabell 3-1 så mycket som möjligt så att den är mer tillförlitlig och täcker de materialtyper som vanligtvis används för markstenkonstruktioner. 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 (t.ex. 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 markstenkonstruktioner. Sorteringar med maximal stenstorlek upp till 32 mm kan analyseras.

Parametrarna "a" och "b" i Tabell 3-1 är regressionskoefficienter för respektive materialtyp. Parametrarna används av ERAPave för beräkning av permanent deformation (t.ex. spårdjup). Parametrarna uppskattas i första hand genom cykliska triaxialförsök eller, i andra hand, från andra

typer av cykliska försök (t.ex. 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. 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 t.ex. 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 undersökning av befintliga markstenskonstruktioner kommer att vara en utmärkt kompletterande valideringsmetod. Det arbetet har påbörjats i denna studie. Begränsningen blir dock att korrekt uppskatta trafikbelastning och 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.

4. 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. Resultaten kan 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.

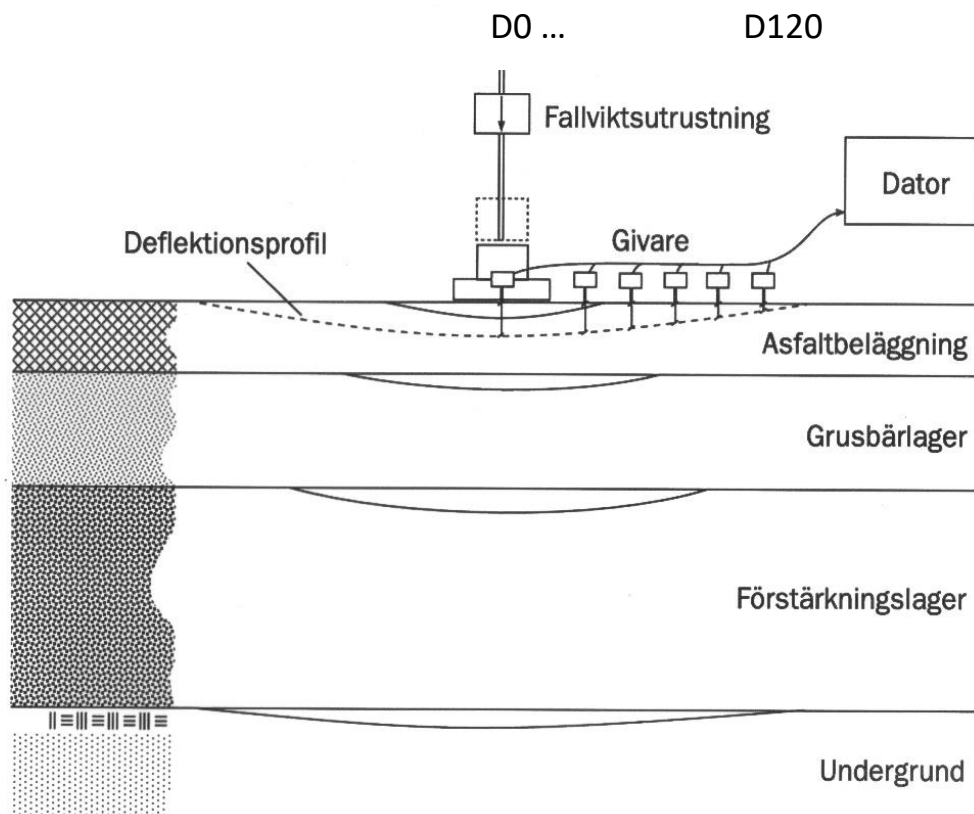
Kunskapen om materialegenskaper på dränerande material är begränsad. Det insamlade fallviktsdata ska därför ses som viktig information att höja kunskapen och en möjlighet att följa upp med nya mätningar efter några års användning.

4.1. 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 4-1. Mätproceduren följer Trafikverkets TDOK 2019:0463.

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 hel vägkroppen styvhet inklusive terrassen. Detta mått används för att beräkna en medelstyvhet eller ytmodul för vägkroppen. 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. 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 konstruktioner. I de flesta fall används en referensyta där standardmaterial och konstruktioner används som jämförs med en yta där dränerande material använts. Ytterligare en osäkerhet är styvheter i markstenskonstruktioner som inte utgör ett kontinuerligt lager utan består av styva stenar med mjuka fogar emellan.



Figur 4-1 Mätprincip för fallviktsutrustning. Notera hur deflektionsprofilen förändras med djup och avstånd till centrum.

4.2. 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 deflektionsbassängen. I 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 t.ex. 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, t.ex. 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 markstensbeläggningar. Markstensbeläggningar består av styva betongstenar som är fogade med fogmaterial vilket gör att det kontinuerliga lagret bryts. Detta kan innebära vissa fel uppstår i beräknade styvhetsvärdena. Det antas dock att antas 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 av styvhetsmoduler) mätta med olika metoder såsom plattbelastning eller liknande. Varje metod ger värden baserat på mättekniken.

4.3. Uppsala kommun - Rosendal

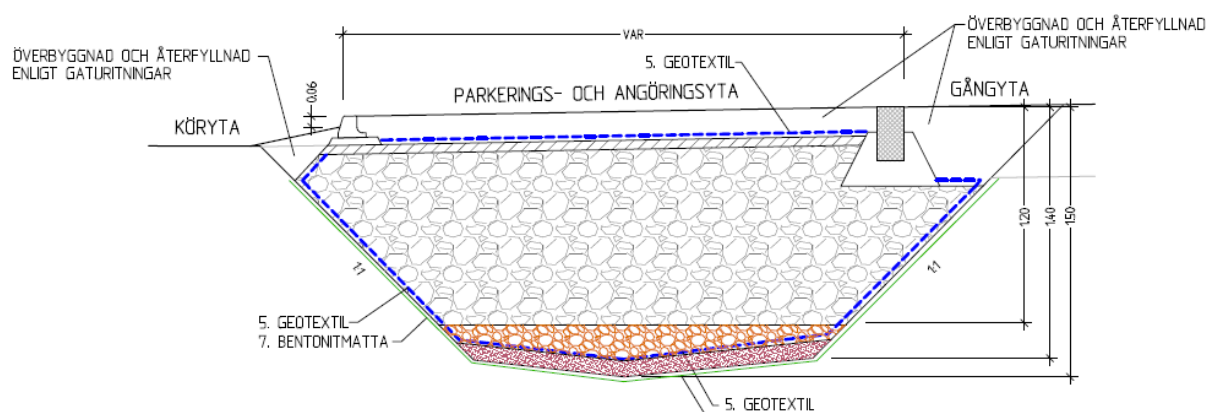
Figur 4-4 och Figur 4-5 visar var fallviktsmätning utförts i Rosendal i Uppsala. Bilder på fallviktsmätning i Rosendal på olika ytor visas i Figur 4-6, Figur 4-7, Figur 4-8 och Figur 4-9. Sammanlagt 18 mätpunkter, från fem typsektioner, har sammanställts i Figur 4-10 och Figur 4-11. Redovisade resultaten är medelvärden från de fem typsektionerna. Konstruktionerna har tätt ytskikt med öppna förstärkningslager i ett BGG system, eller standard förstärkningslager (0/90). Konstruktionerna som mätningar med fallvikts har utförts på 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 bitumenbundet bärlager innan ytskikt av marksten har satts på plats.

Tabell 4-1 visar lagertjocklekar och gradering på använt material i konstruktionerna. En skillnad mellan BGG systemen är att etapp 1 utgörs av ytor vid sidan av körfältet som är sammankopplade medan etapp 2 utnyttjar hela gatan. Skillnaden illustreras i Figur 4-2 och Figur 4-3. Etapp 2 innehåller också ett bitumenbundet bärlager som är tänkt att ge ytterligare bärighet.

Tabell 4-1. Konstruktionernas uppbyggnad

		BGG konstruktion Ettapp 1	BGG konstruktion Gata Ettapp 2	Standard konstruktion Ettapp 1
		mm	mm	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	100	



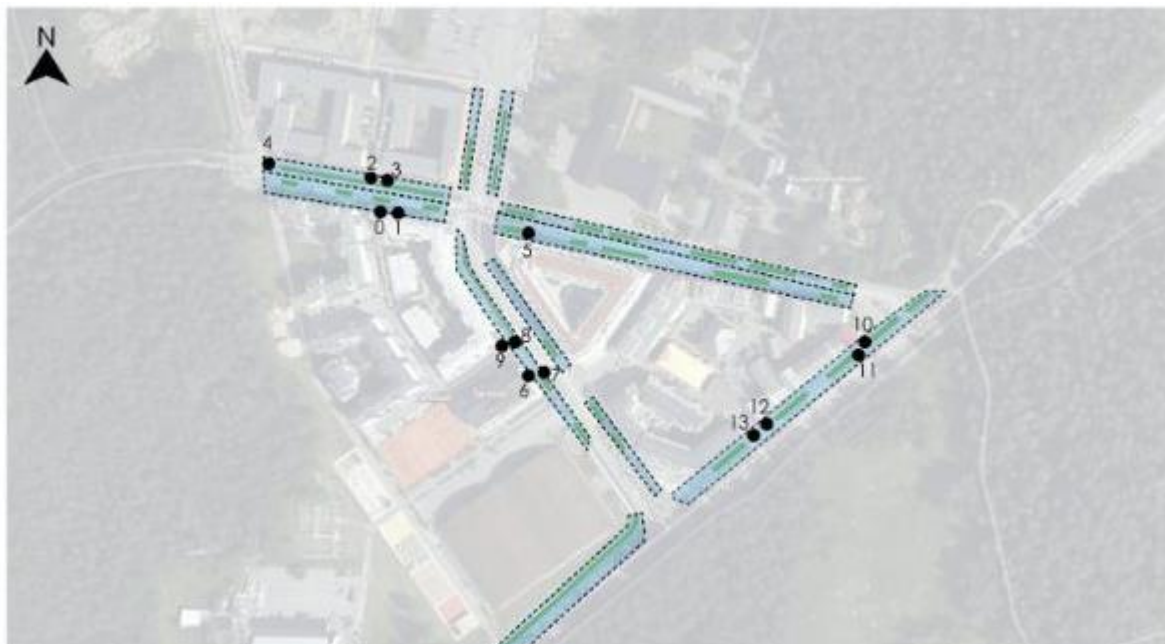
Figur 4-2 Illustration av konstruktion av BGG ytor ettapp 1 vid parkeringsytor



Figur 4-3. Illustration av BGG ytor under gata etapp 2.

4.3.1. Resultat

Fallviktsmätning ger information om deflektion eller nedsjunkning på olika avstånd från centrum från en platta som belastas av nedfallande vikt. Deflektionerna ger information som kan räknas om till styvheten i lagren på olika djup. Det enklaste sättet är att använda D_0 som är nedsjunkningen i centrum under fallvikten. Den ger ett medelvärde (dvs ytmodulen) på totala styvheten i konstruktionen. Den visas i Figur 4-11. 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 bärlaget ger en ökad styvhet. Ytan som inte var färdigställd där mätning gjordes direkt på det bundna bärlaget hade störst styvhet. Eventuellt kan andra platsspecifika saker påverka som t.ex. 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 4-4 Karta som visar plats för fallviktsmätning i Uppsala Rosendal, etapp 1



Figur 4-5. Karta som visar plats för fallviktsmätning i Uppsala Rosendal, etapp 2



Figur 4-6. Fallviktsmätning Rosendal Etapp 1, Uppsala på Vårdsätravägen



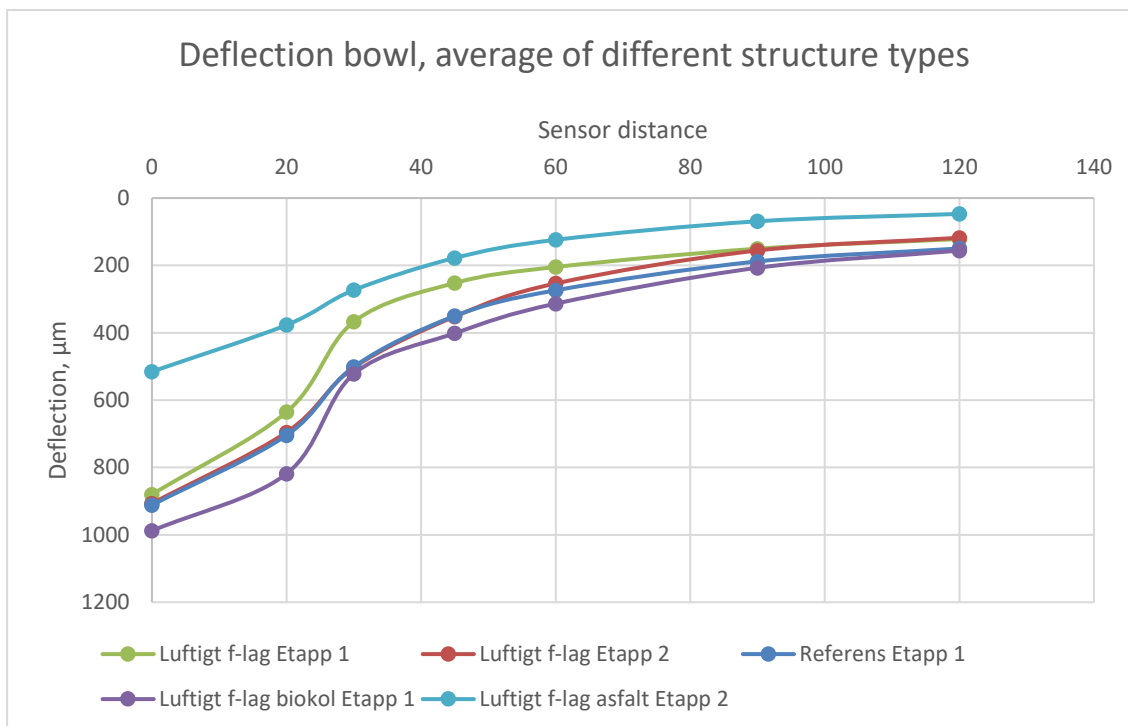
Figur 4-7. Fallviktsmätning Rosendal etapp 1, Uppsala på Torgny Segerstedts allé



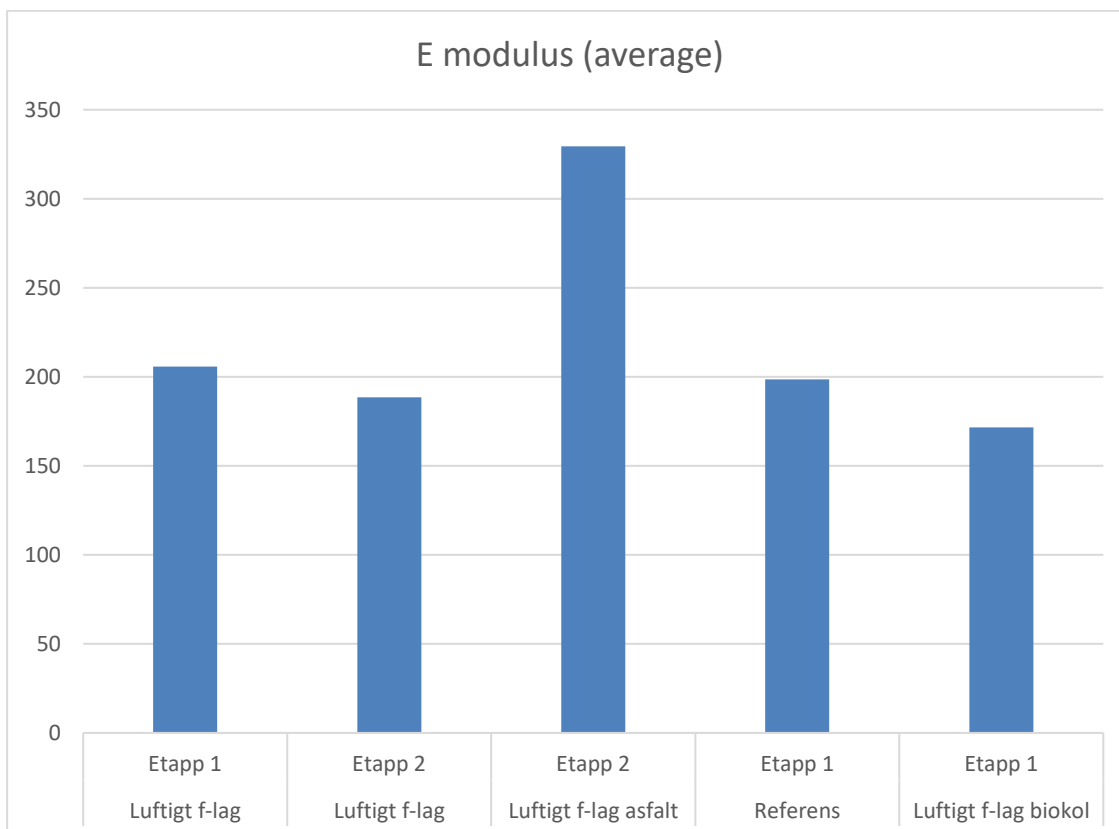
Figur 4-8. Fallviktsmätning Rosendal etapp 2 på Amanuensgatan.



Figur 4-9. Fallviktsmätning på obundet bärlager i Rosendal etapp 2 på Dekangatan.



Figur 4-10. Figuren visar medelvärden av deflektionsdata från fallviktsmätning från de 5 olika typsektionerna i Uppsala Rosendal.



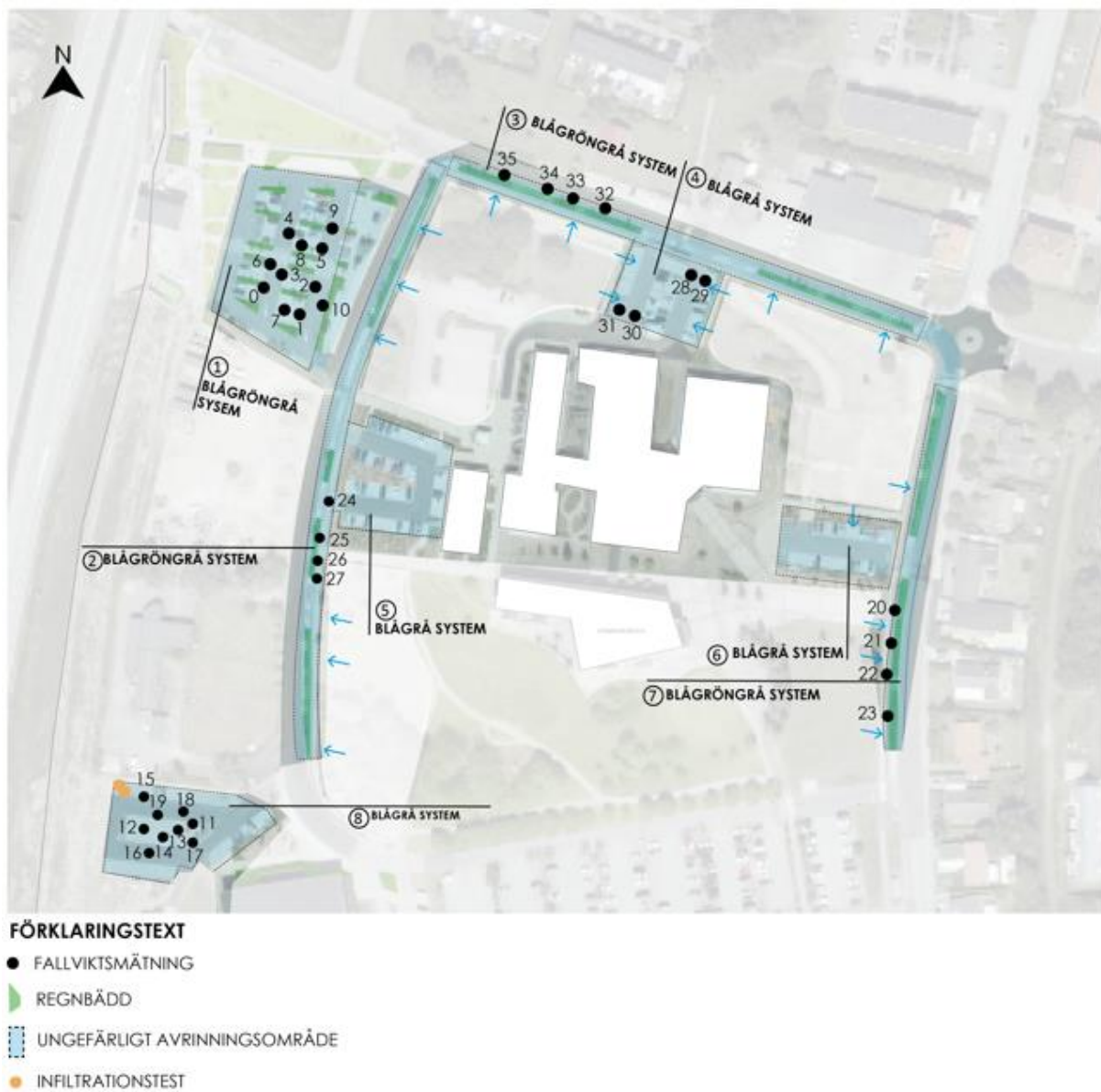
Figur 4-11. Figuren visar beräknade medelvärde för ytmoduler från de fem typsektionerna baserade på deflektionsdata från Figur 4-10.

4.4. Campus i Vellinge

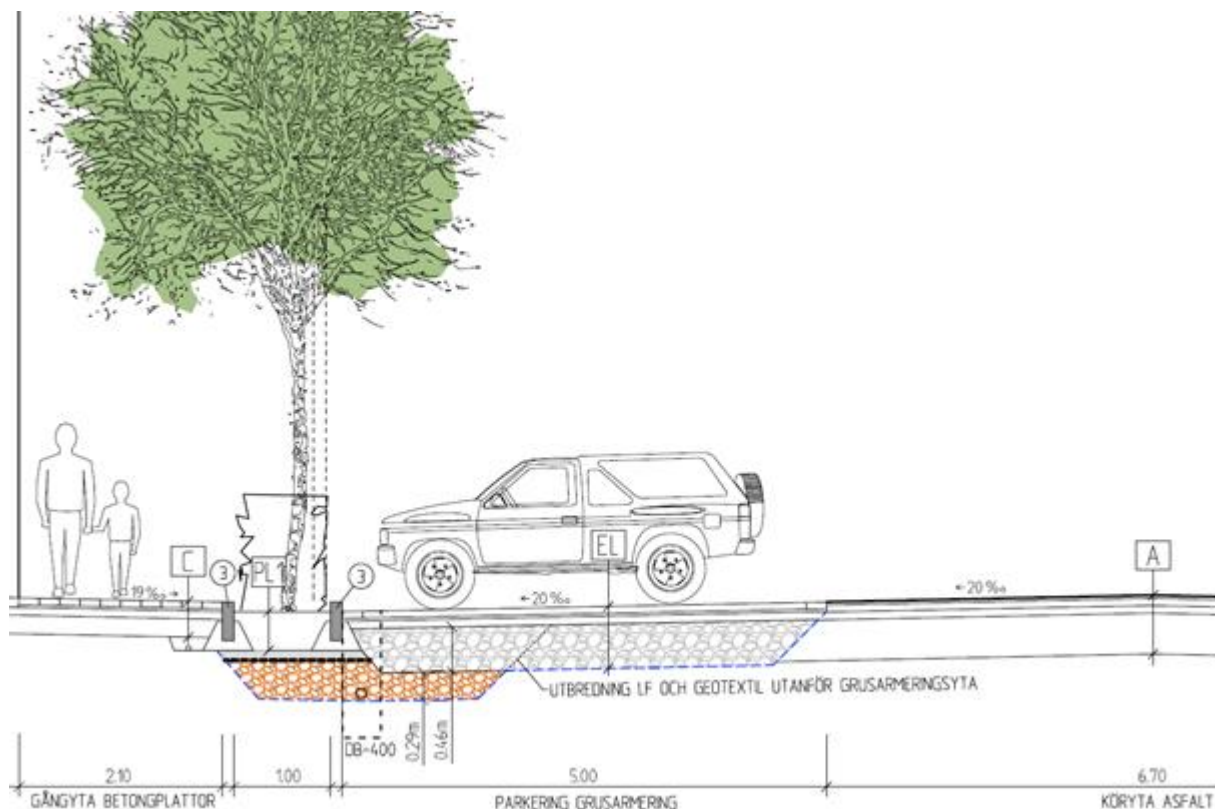
Figur 4-12 visar var fallviktsmätningarna utförts i Vellinge. Olika typer av konstruktioner har testats. Dränerande gräsarmerad markstenbeläggning med dränerande obundna material på parkeringsytor (Figur 4-13, Figur 4-15 och Tabell 4-2) har testats på 18 platser. Bredvid parkeringsytorna har även 11 ytor som inte är dränerande provats som referens. Dessa är körytor med asfaltsyta och 0/32 och 0/90 obundna bergmaterial (Figur 4-13 sektion A, Figur 4-16 och Tabell 4-3). Förutom parkeringsytorna har även cykelvägar med asfalt provats. Dessa har en uppbyggnad enligt Tabell 4-4 sektion B, samt Figur 4-14 och Figur 4-17.

4.4.1. Resultat

Medelvärde av deflektionsvärdena visas i Figur 4-18. 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 4-19 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 4-12. Karta över utförda fallviktsmätningar i Vellinge



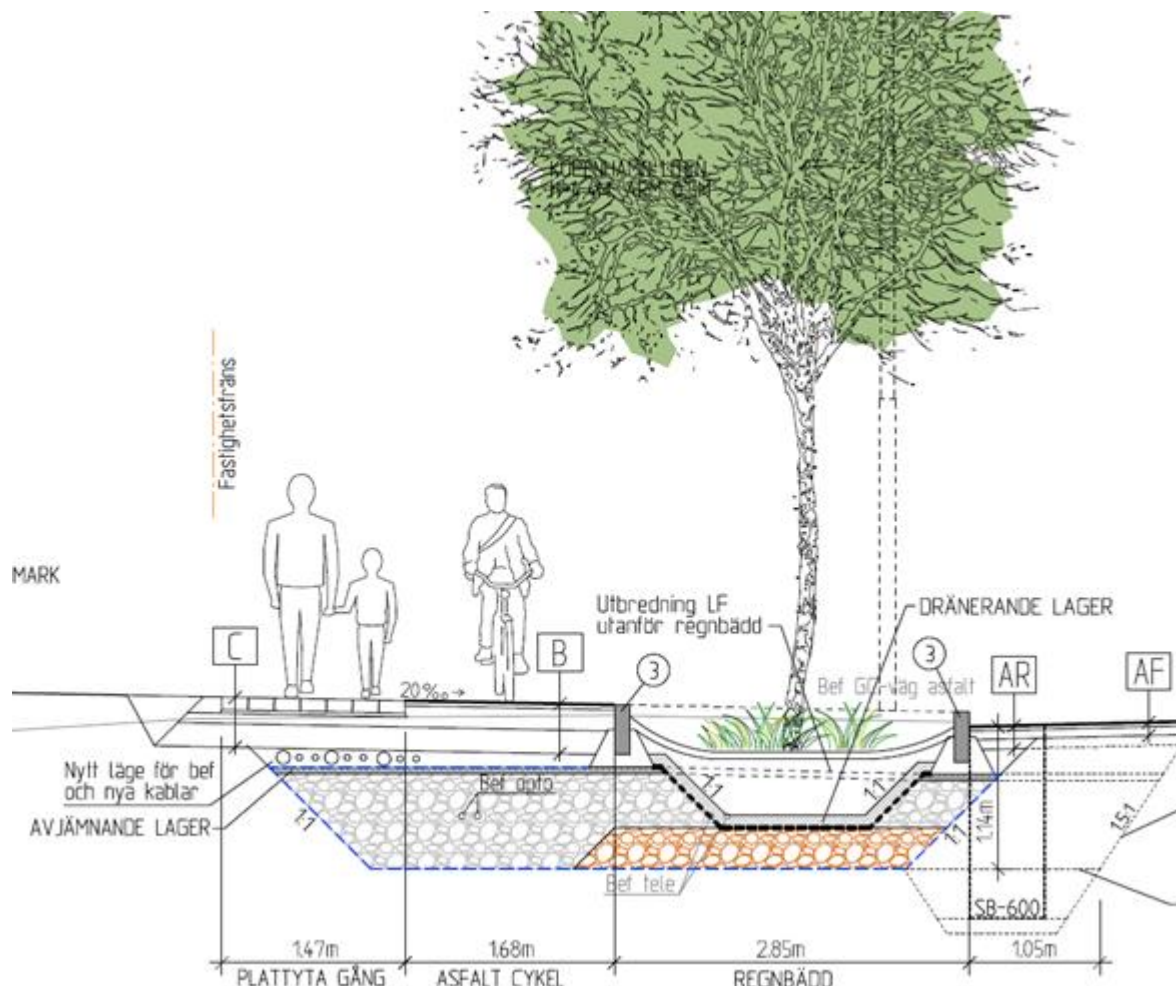
Figur 4-13. Illustration av konstruktion av parkeringsytor med marksten i Vellinge

Tabell 4-2 Lagertjocklek för parkeringsytor i Vellinge

ÖVERBYGGNADSTABELL FÖR EL-yta			
NR	BENÄMNING	MATERIAL	TJOCKLEK [MM]
	Dränerande beläggning	Betong marksten 263x88	70
	Sättmaterial	Makadam 2/5	30
	Dränerande bärlager	Makadam 4/32	80
	Öppet förstärkningslager	Makadam 22/90	460
	Öppet förstärkningslager	Makadam 32/63	300–400

Tabell 4-3 Lagertjocklekar för referensytor (sektion A enligt Figur 4-13)

FÖRKLARINGAR			
A - NY ÖVERBYGGNAD KÖRBANA ASFALT t=605mm			
	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 4-14 Illustration över konstruktionen av gång och cykelväg samt växtbädd

Tabell 4-4 Lagertjocklek för cykelväg med asfalt samt gångväg med marksten i Vellinge

ÖVERBYGGNADSTABELL			
NR	BENÄMNING	MATERIAL	TJOCKLEK [MM]
B Cykelyta Asfalt t=400mm			
	Beläggning	ABT8 160/220	40
	Obundet bärlager	Samkross 0-32	170
	Förstärkningslager	Samkross 0-90	190
C Gångyta Betong marksten t=400mm			
	Beläggning	Betong	100
	Sättmaterial	Sand	30
	Obundet bärlager	Samkross 0-32	80
	Förstärkningslager	Samkross 0-90	190
	Avjämnande lager	Makadam 8/16	50
	Öppet förstärkningslager	Makadam 22/90	400-950
	Öppet förstärkningslager	Makadam 32/63	330-380
	Avskiljande lager	Kokosmatta	
	Avskiljande lager	Geotextil	



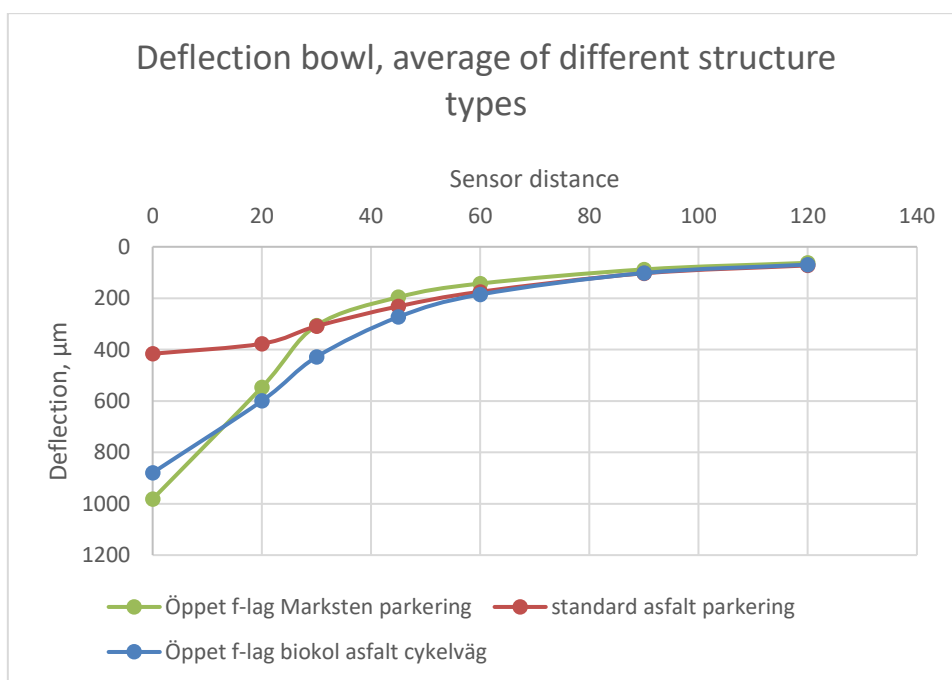
Figur 4-15. Fallviktsmätning på gräsarmerad parkeringsyta i Vellinge med fog av 2/5. Standard konstruktion med asfalt i anslutning till p-ytorna har använts som referens.



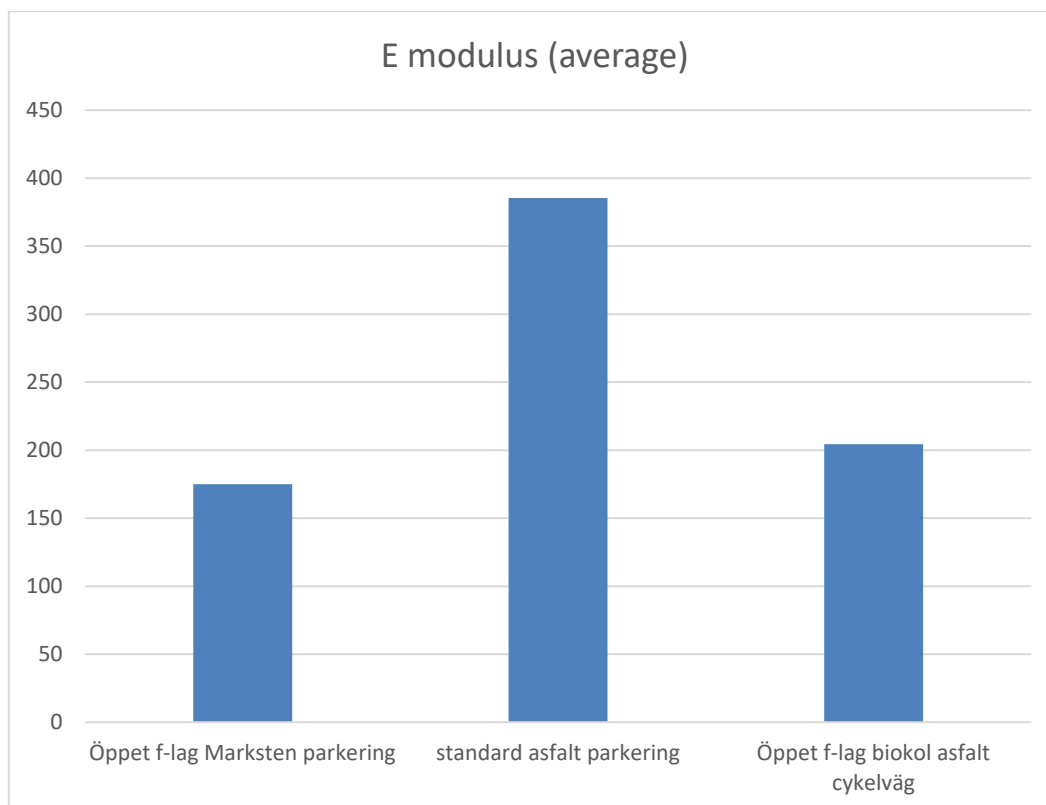
Figur 4-16. Standard parkeringsyta i Vellinge



Figur 4-17. Fallviktsmätning på cykelväg med öppet förstärkningslager i anslutning till växtbädd.



Figur 4-18. Deflektionsdata från fallviktsmätning i Vellinge



Figur 4-19. Ytmoduler från tre olika typ konstruktioner i Vellinge

4.5. Ängelholms kommun - Munka Ljungby

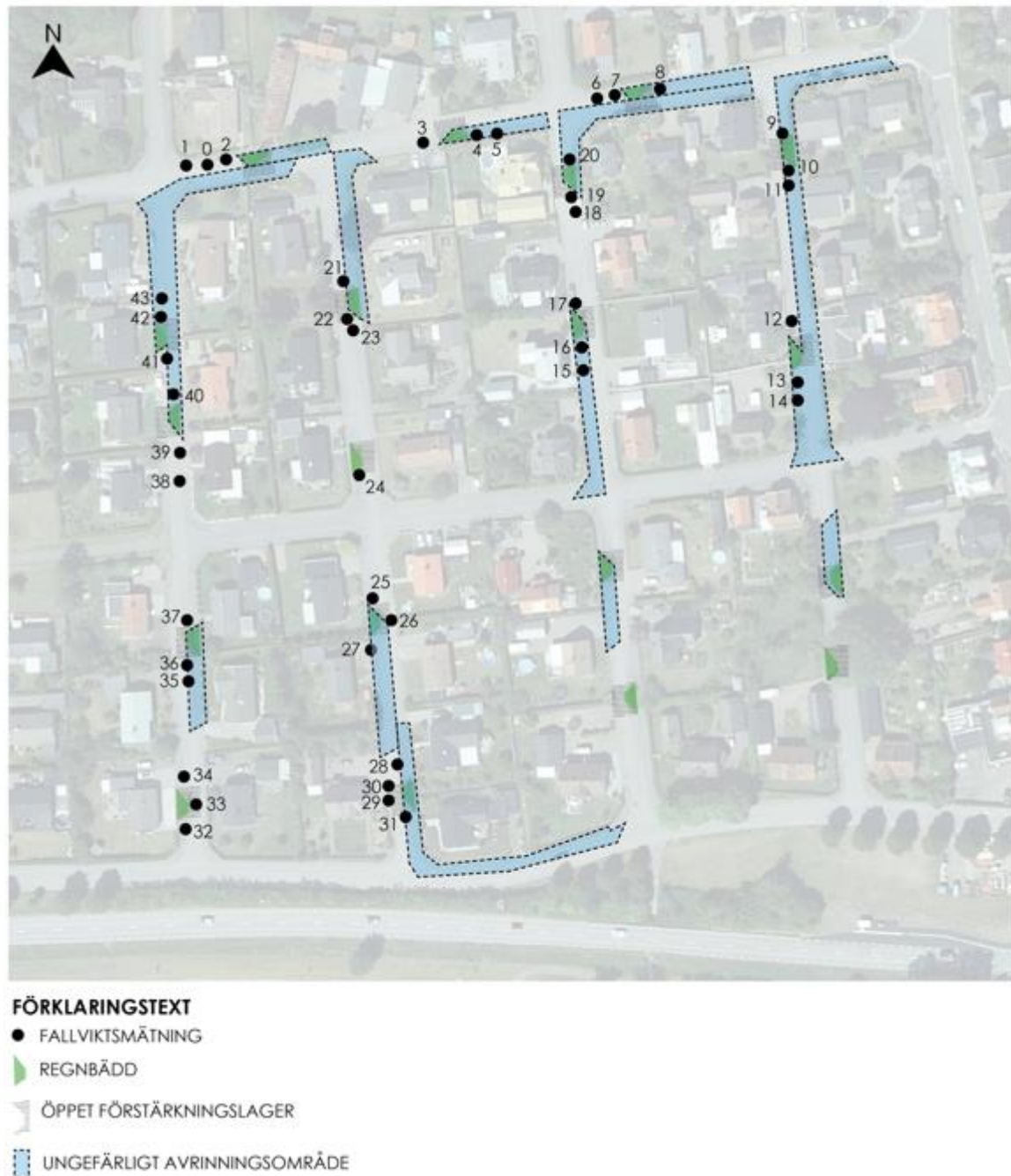
I Ängelholms kommun i Munka Ljungby har det byggts regnbäddar med BGG-konstruktion som sträcker sig ut under körbanan på gatorna i ett villaområde för att minska risken för översvämning. Figur 4-20 visar området och var fallviktsmätningarna har gjorts. 15 mätningar har gjorts på asfaltsytor med öppet förstärkningslager och 28 mätningar på referensytor med standard förstärkningslager. Uppbyggnad och lagertjocklek beskrivs i Tabell 4-5 och Figur 4-21. Fallviktsmätning har utförts på den dränerande konstruktionen samt referensmätning på vardera sida om växtbädden på standardkonstruktion (Figur 4-22 och Figur 4-23).

Tabell 4-5. Lagertjocklekar och uppbyggnad av BGG- och standardkonstruktion.

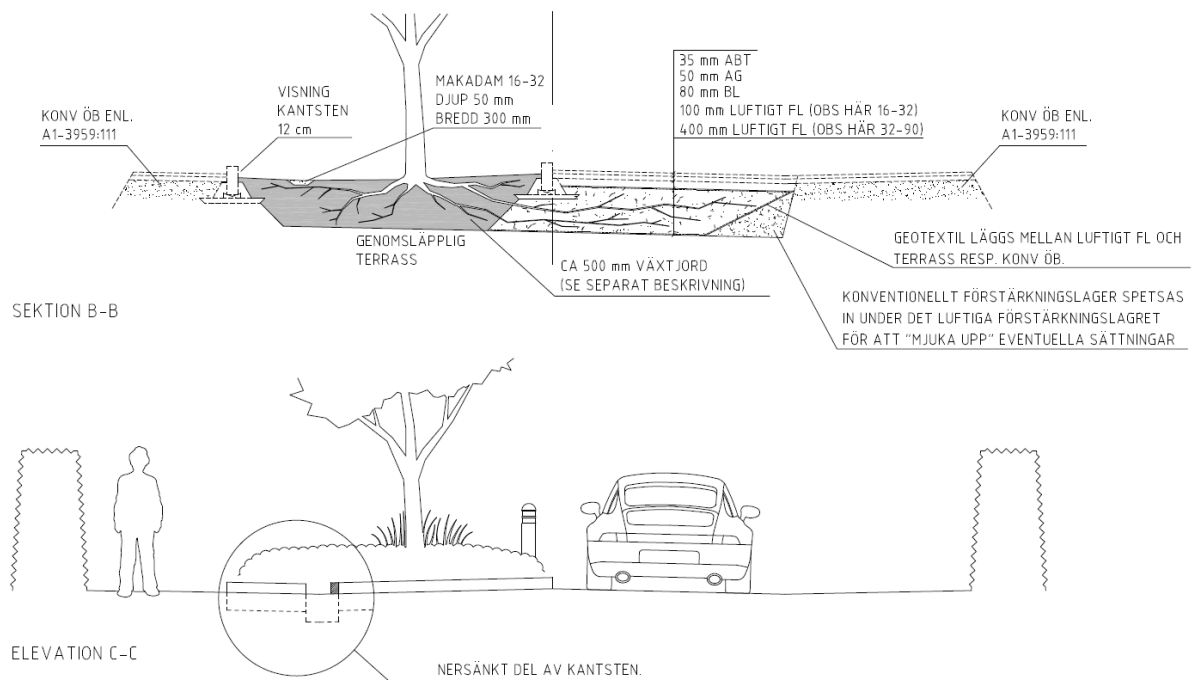
		BGG-konstruktion	Standardkonstruktion
	Sortering	Lagertjocklek	
ABT		35 mm	35 mm
AG		50 mm	50 mm
Bärlager	0/32	80 mm	80 mm
Öppet förstärkningslager	16/32	100 mm	
Öppet förstärkningslager	32/90	400 mm	
Förstärkningslager	0/90		500 mm

4.5.1. Resultat

Medelvärden av deflektionsvärdena från dränerande ytorna respektive standardkonstruktioner visas i Figur 4-24. De beräknade ytmodulerna visas i Figur 4-25. Man kan vid jämförelse se att standardkonstruktionerna har en högre styvhet och lägre deflektion. Skillnaden är dock inte så stor och i praktiken kan man inte se att de dränerande ytorna har mer spår eller skador efter några år i drift (dock lågtrafikerad gata). Ytmodulen för de dränerande ytorna är i medel 393 MPa och för referensytorna 483 MPa. Dessa värden bedöms som höga för användningsområdet.



Figur 4-20. Karta som visar plats för fallviktsmätning i Munka-Ljungby (osäkerhet i GPS-punkterna gör att några hamnar utanför vägen)



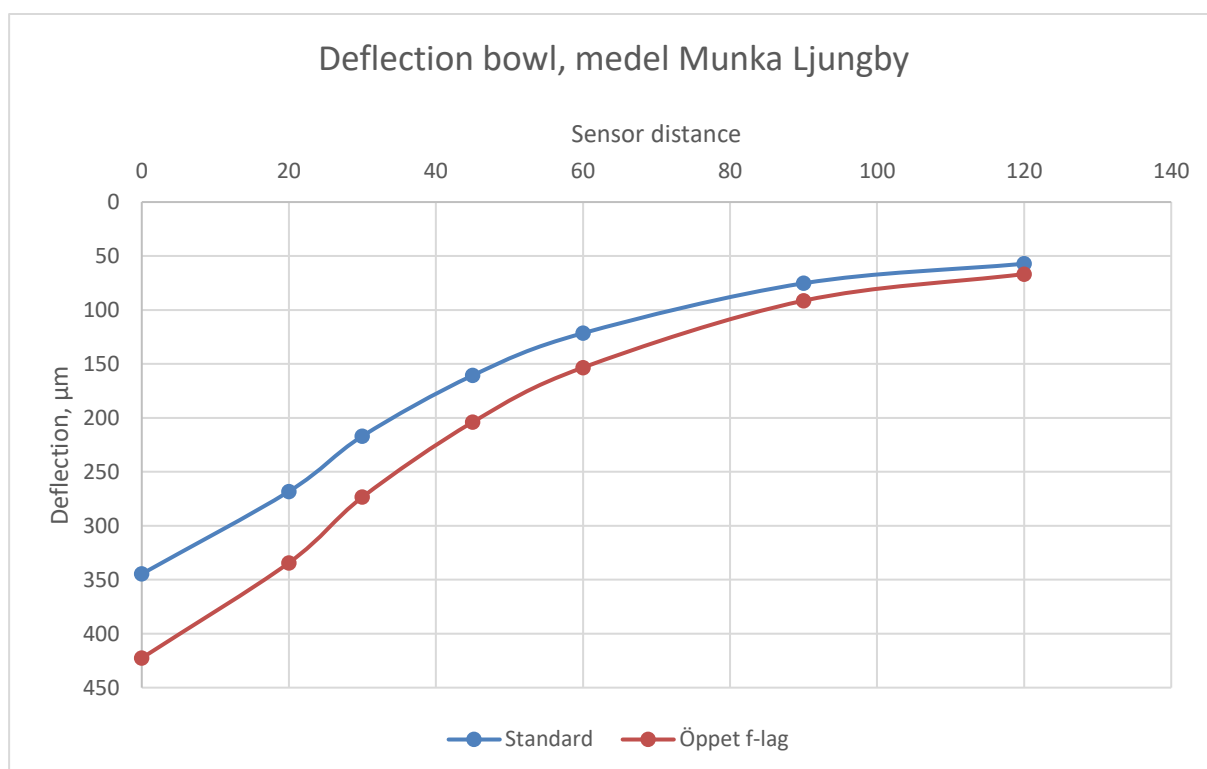
Figur 4-21. Konstruktionsritning av växtbädd och tillhörande körfält med öppet förstärkningslager.



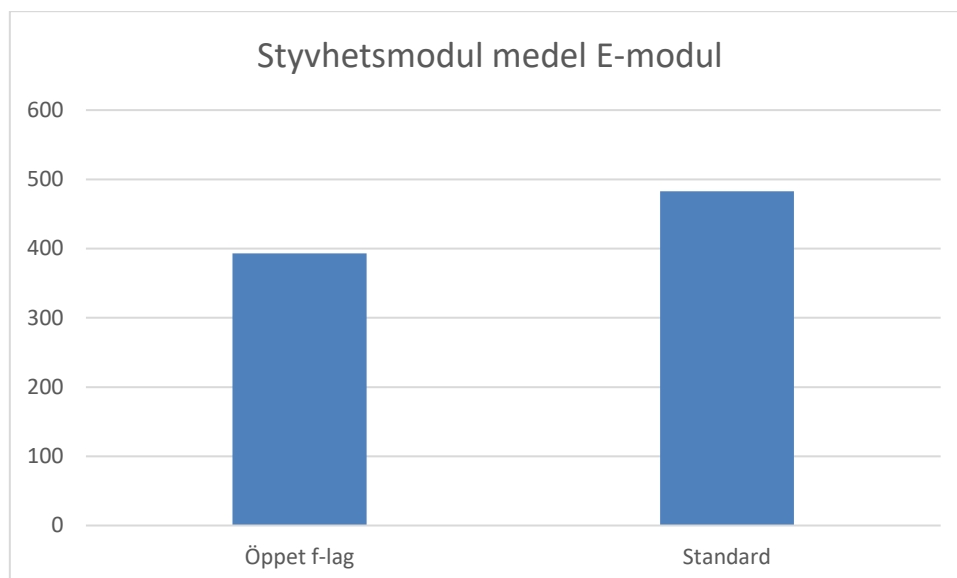
Figur 4-22. Fallviktsmätning på BGG-konstruktion i Munka Ljungby



Figur 4-23. Fallviksmätning på standardkonstruktion i Munka Ljungby



Figur 4-24. Figuren visar medeldeflektioner på 15 platser med öppet förstärkningslager och 28 platser med standard förstärkningslager.



Figur 4-25. Figuren visar beräknade medelvärden för ytmoduler för konstruktion med öppet förstärkningslager baserade på deflektionsdata från Figur 4-24

4.6. Vara

I Vara kommun ligger en industriyta där Jem & 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 4-6. Ytan trafikeras av varuhusets kunder i bil och andra varutransporter som t.ex. lastbilar och truckar. Tio fallviktsmätningar har gjorts på olika ställen på ytan enligt Figur 4-26 och Figur 4-27 visar fallviktsutrustningen i färd med att mäta vid Jem & 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 4-6. Uppbyggnad av dränerande markstenskonstruktion vid Jem & Fix

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

4.6.1. Resultat

Resultaten visar att deflektionerna från fallviktsmätningarna varierar ganska mycket mellan de olika mätplatserna (Figur 4-28). Orsaken till detta kan vara att det finns olika installationer som t.ex. kabel- och VA-installationer under markytan alternativt att packningen av de obundna lagren blivit ojämn. De beräknade ytmodulerna (Figur 4-29) 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.



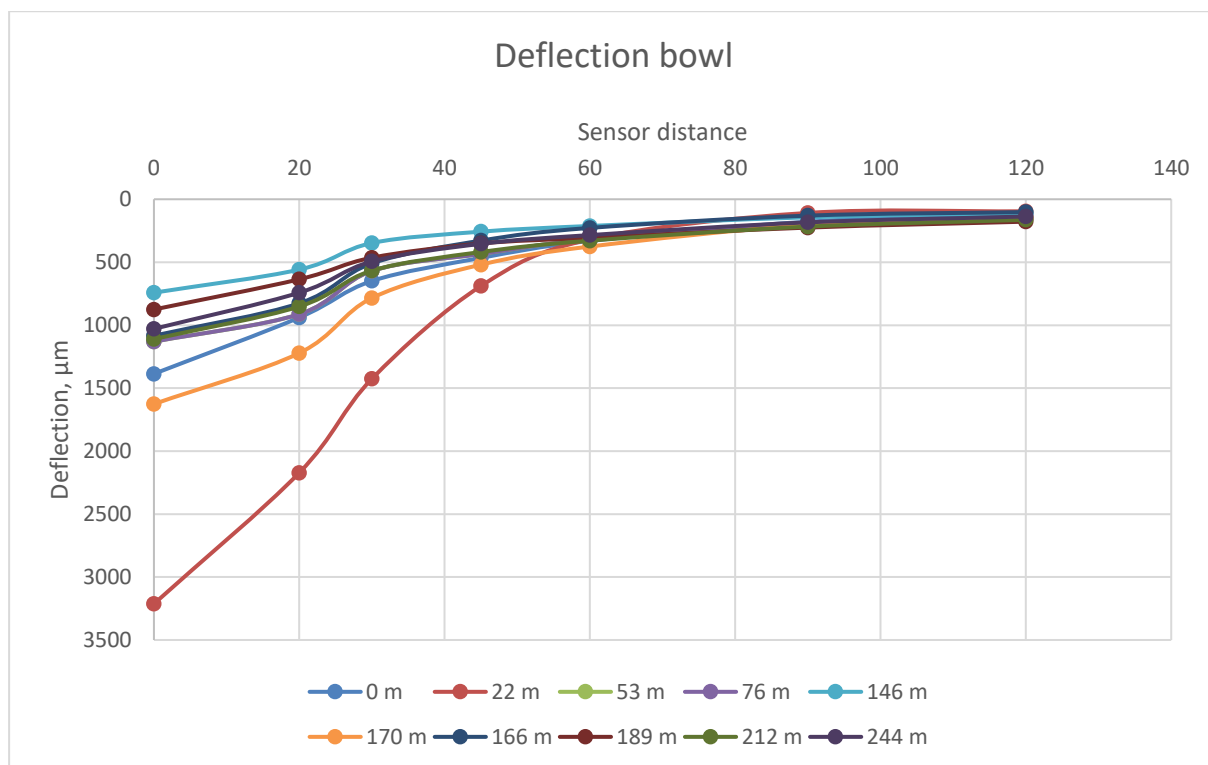
FÖRKLARINGSTEXT

- FALLVIKTSMÄTNING
- UNGEFÄRLIGT AVRINNINGSOMRÅDE
- INFILTRATIONSTEST

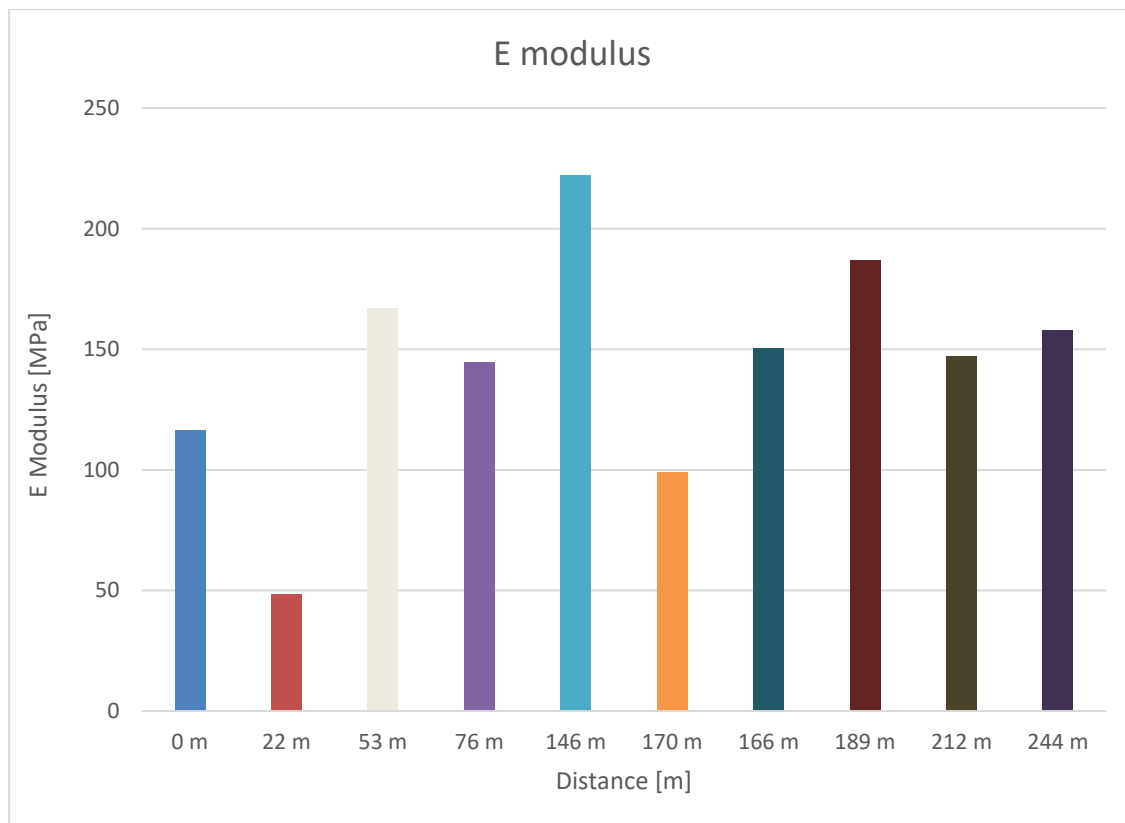
Figur 4-26. Karta som visar plats för fallviktsmätning i vid industriyta i Vara



Figur 4-27. Fallviksmätning på dränerande markstensyta på Jem & Fix i Vara



Figur 4-28. Deflektioner från fallviksmätning på Jem & Fix. Sammanlagt 10 enskilda punkter.



Figur 4-29. Beräknade ytmoduler från fallviktsmätningarna på Jem & Fix (Vara)

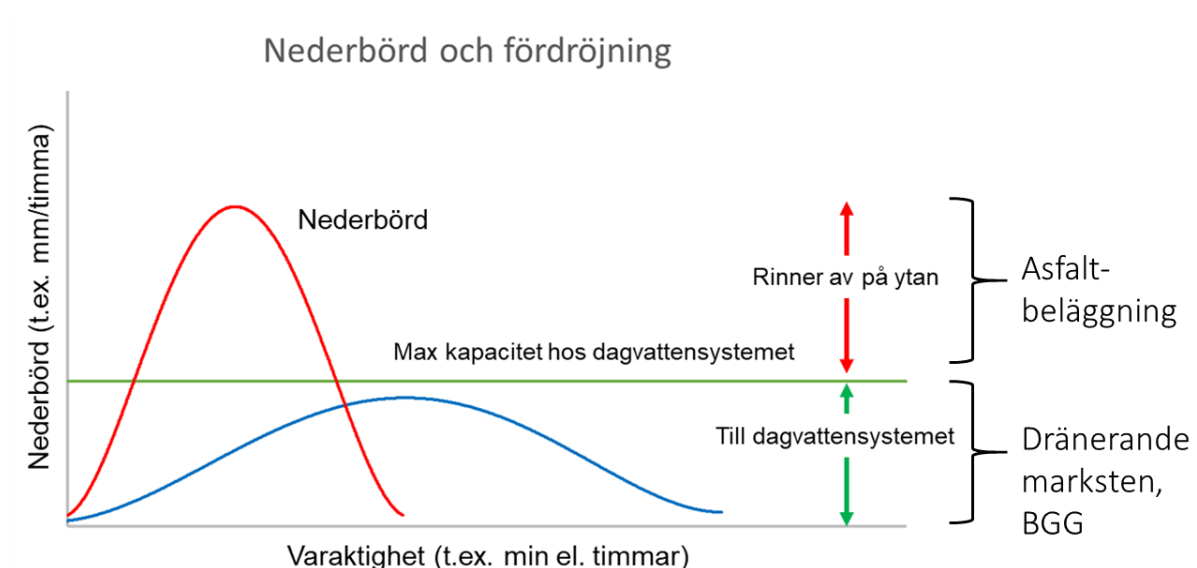
5. INFILTRATIONSMÄTNING – DRÄNERANDE BELÄGGNINGAR

5.1. Inledning

När det regnar på en asfalterad yta (röd kurva i Figur 5-1) så startar regnet normalt med låg intensitet. Intensiteten ökar sedan succesivt för att 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 kopplat till samma dagvattensystem kommer volymen vatten snabbt att överstiga dagvattensystemets maximala kapacitet (den gröna linjen i Figur 5-1). Vattnet som inte får plats i dagvattensystemet kommer att rinna av på yta. 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 blå kurvan (i Figur 5-1) 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 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 underskrider behovet att klara dimensionerande nederbörd, t ex ett 30-, eller 50-årsregn.



Figur 5-1 Illustration av nederbörd och avvattning av traditionell konstruktion och BGG-konstruktion med dränerande markstensbeläggning

5.2. 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 på dimensionerande nederbörd

5.2.1. Initial infiltrationskapacitet

När beläggningen är nylagd är den helt opåverkad av igensättning. Beläggningen infiltrerar vatten endast igenom fogen. Beläggningens infiltrationskapacitet 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).

Faktaruta:

Så här beräknar du beläggningens initiala infiltrationskapacitet

När du vet fogmaterialets permeabilitet och fogarean så kan du beräkna beläggningens initiala infiltrationskapacitet med den här formeln:

Initial infiltrationskapacitet = fogmaterialets permeabilitet x fogens andel av totala ytan

= 36 000 (mm/h) x 0,13 (%/100) = 4680 mm/h

Med 13% fogarea blir beläggningens initiala infiltrationskapacitet alltså 4 680 mm/h

Figur 5-2 Faktaruta: Beräkning av beläggningens initiala infiltrationskapacitet, efter Svensk Markbetong (2019).

5.2.2. 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 (10 – 25%) är alltså hur mycket den initiala infiltrationen reduceras med i förhållande till den slutliga infiltrationen.

Faktaruta:

Så här beräknar du beläggnings infiltrationskapacitet efter 8 – 12 år:

Infiltrationskapacitet (efter 8-12 år) = Initial infiltrationskapacitet x reduktion (efter 8-12 år)

$$= 4680 \text{ (mm/h)} \times 0,2 = 936 \text{ mm/h}$$

Med en reduktionsfaktor på 20% blir beläggnings infiltrationskapacitet 936 mm/h efter 8-12 års igensättning av fogarna.

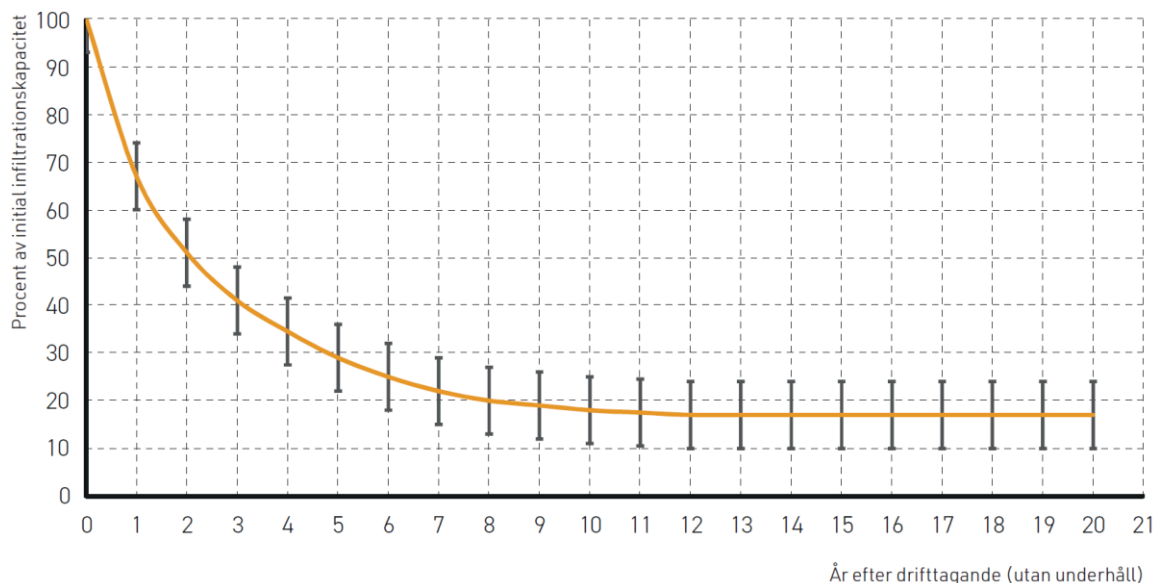
Om du vill ta höjd för eventuella variationer och ha en säkerhetsmarginal så kan du använda en säkerhetsfaktor på till exempel 2.

Dvs. beläggnings infiltrationskapacitet efter 8 – 12 år med säkerhetsfaktorn 2 kan då beräknas som:

Infiltrationskapacitet (efter 8-12 år) = Initial infiltrationskapacitet x reduktion x 1/säkerhetsfaktor

$$= 4680 \text{ (mm/h)} \times 0,2 \times 1/2 = 468 \text{ mm/h}$$

Figur 5-3 Faktaruta: Beräkning av beläggnings infiltrationskapacitet efter 8 – 12 år, efter Svensk Markbetong (2019).



Figur 5-4 Illustration av beläggningens infiltrationskapacitet över tid, efter Borgwardt (2015).

5.2.3. Intensitet för dimensionerande nederbörd

Vi har nu räknat fram beläggningens infiltrationskapacitet efter ca 8 - 12 år till 468 mm/h (80% reduktion av initial infiltrationskapacitet samt säkerhetsfaktor på 2). Siffran säger inget i sig, utan måste sättas i relation till vilken dimensionerande nederbörd som gäller för den aktuella ytan.

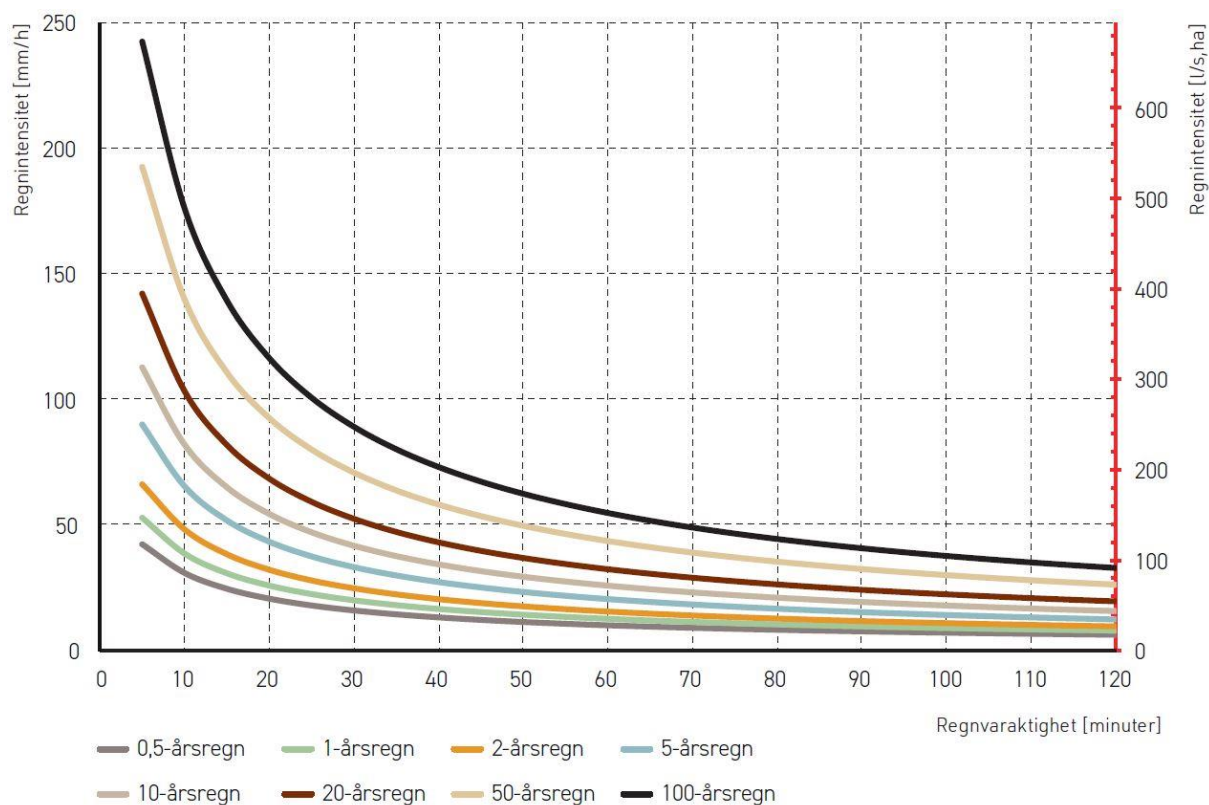
Om nederbördens intensitet (mm/h) överstiger beläggningens infiltrationskapacitet kommer en del av nederbörden rinna av på ytan. Hur mycket som rinner av på ytan motsvarar nederbördens intensitet minus beläggningens infiltrationskapacitet. Endast när infiltrationskapaciteten är 0 mm/h (t.ex. som för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

Fördröjning av dagvatten dimensioneras vanligen utifrån ett specifikt fördröjningskrav, t.ex. 20 mm nederbörd eller utifrån nederbörd som statistiskt återkommer med vissa intervall, t.ex. 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 30-års regn inte bara har ett definierad scenario. 30-årsregnet kan manifesteras på många olika sätt beroende på regnets varaktighet.

I figuren nedan kan du exempelvis läsa att ett 50-års regn som varar i 10 minuter har en intensitet på ca 140 mm/h. Och för ett 50-årsregn som vara 30 minuter är intensiteten ca 75 mm/h.

För dimensionering av anläggningar som beräknas vara i bruk i slutet av detta århundrade ska en klimatfaktor användas, enligt Svenskt Vattens rekommendationer. Klimatfaktorn kompenserar för den förväntade ökningen av nederbörd. Klimatfaktorn används som multiplikator för t.ex regninntensitet (Figur 5 5) och ligger normal mellan 1.20 och 1.25. För enkelhets skull har klimatfaktorn uteslutits från diskussionen ovan. Konklusionerna påverkas dock inte av detta.

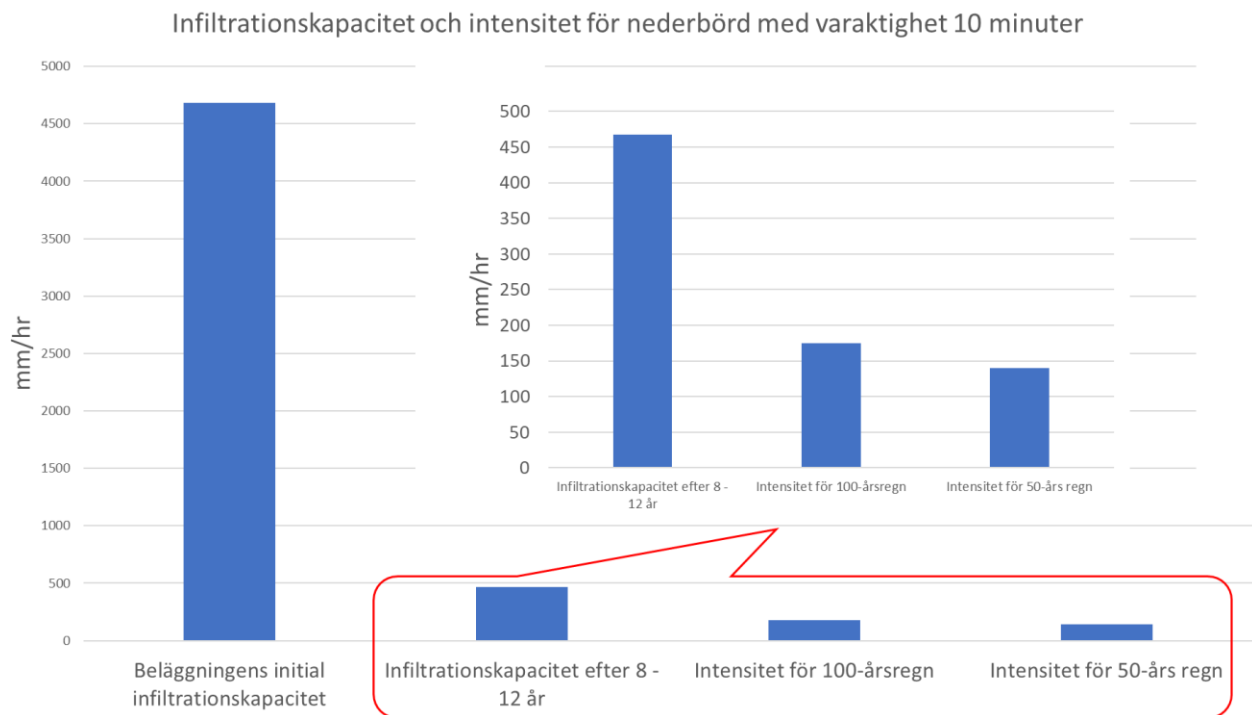


Figur 5-5 Regnintensitet som funktion av återkomsttid och varaktighet (utan klimatfaktor)

5.2.4. Sätter fogarna igen i dränerande beläggningar?

I Figur 5-6 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 och oberoende av regnets varaktighet!



Figur 5-6 Infiltrationskapacitet och intensitet för 50- och 100-årsregn med varaktighet 10 minuter (utan klimatfaktor eller hänsyn till ev. avledning från externa ytor)

5.2.5. Avledning till dränerande ytor

Ovan resonemang angående behovet av infiltrationskapacitet (nederbördens intensitet) gäller för ytor där endast den nederbörd som faller direkt på den dränerande ytan behöver infiltreras. I de fall nederbörd avleds från intilliggande täta hårdgjorda ytor till en dränerande ytan kommer behovet av infiltrationskapacitet öka. Förenklat kan "ekvivalent" nederbördsintensitet definieras för nederbördens intensiteten på dränerande yta som har tillskott från tillrinning från extern yta enligt Figur 5-7.

Faktaruta:

Så här beräknar du "ekvivalent nederbördsintensitet" för dränerande yta med tillskott från tillrinning från extern yta.

$$i_{ekv} = i_{dim} \times f_c \times \left(1 + \frac{area_{tät}}{area_{drän}}\right)$$

i_{ekv} = Ekvivalent nederbördsintensitet, dvs beläggningens infiltrationskapacitet måste överstiga detta värdet för att vatten inte ska bli stående på ytan

i_{dim} = intensitet för dimensionerande nederbörd med återkomsttid t. ex 30, 50 eller 100 år (se Figur 5-5)

f_c = Klimatfaktor enligt Svensk Vatten P104 (1,05 – 1,3)

$area$ = area för tillskottsytta (tät) respektive dränerande yta som ska infiltrera nederbörden (drän)

Figur 5-7 Faktaruta: Beräkning av behovet av infiltrationskapacitet för dränerande yta med tillskott från tillrinning från extern yta.

5.3. Infiltrationsmätning med dubbelringsinfiltrometer

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.

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 dubbelringsinfiltrometern 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 5-12). Man bör därför borsta ytan lätt för att kunna lokalisera optimala platser att mäta på.



Figur 5-8 Infiltrationsmätning med dubbelringsinfiltrrometer.

5.4. Vara

Ytan i Vara (Jem & Fix) beskrivs i mera detalj i avsnitt 4.6. Ingen tillrinning av nederbörd från andra intilliggande ytor sker, med andra ord sker infiltration endast av nederbörd som faller på ytan.

Tabell 5-1 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 5-9. Mätpunkterna korrespondera med mätpunkter för fallviktsmätningen (22m, 53m, 146m, 166m och 189m) enligt Figur 4-26. 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 mycket tung belastning och kan trafikeras tom trafikklass 4 (Figur 5-10).



Figur 5-9 Mätpunkter för fallviktmätning och infiltration i Vara.

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 5-5) mer än 17 ggr.

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 5-4), korresponderar 2 års användning av ytan till ca 45 till 60% reduktion av infiltrationsförmågan jämfört med initial infiltrationskapacitet.

Vid ett motsvarande försök i VINNOVA-projektet "Klimatsäkrade systemlösningar för urbana ytor" uppmättes initial (och opåverkat) infiltrationskapacitet på en i det närmaste identisk konstruktion till ca 11 500 till 15 000 mm/h (Döse och Schouenborg 2017). 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 förväntat igensättningstakt enligt Figur 5-4. Antagande om att infiltrationskapaciteten följer normal utveckling (enligt Figur 5-4) kan endast verifieras med ytterligare uppföljning och mätningar, förslagsvis vart annat år.



Figur 5-10 Dränerande marksten av typ Delta Drain (Benders) vid Jem & Fix i Vara.



Figur 5-11 Detalj av dränerande betongmarksten som används i Vara (Delta drain, Benders)

Tabell 5-1 Resultat från infiltrationsmätningar i Vara

Mätpunkt	Försök nr.	Medelvärde (liter)	Tid (s)	Vattenflöde (l/s)	Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Hydraulisk konduktivitet (mm/h)	Hydraulisk konduktivitet medel (m/s)	Hydraulisk konduktivitet medel (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	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	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	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	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	1,39E-03	5 006

5.5. Campus i Vellinge

Ytan vid Campus i Vellinge beskrivs i detalj i avsnitt 4.4. Tabell 5-2 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 5-12) som har en fogarea tillgänglig för infiltration på 18,4 %. Stenen är i första hand avsett för armering av gräs men kan, om fogmaterialet byts till makadam i fraktionen 2/5, användas som infiltrerande beläggning upp tom trafikklass 1a. Ytan har 790 m² tät hårdgjord yta som avleds till 525 m² dränerande beläggning.

Två mätningar genomfördes inom område 8 enligt Figur 5-13 och resultaten sammanfattas i Tabell 5-2. 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 5-4, är förväntat infiltration ca 28 till 42% av den initiala. Den dränerande beläggningen ligger nära planteringar och annan vegetation och visuell inspektion synade relativt hög grad av grönska i fogarna. Det är därför rimligt att anta att igensättningstakten är relativt hög och att infiltrationskapaciteten ligger nära den lägre förväntade värdet (ca 28%). Aktuell infiltrationskapacitet ligger trots detta avsevärt över (som lägst ca 5 ggr) behovet att kunna infiltrera t.ex. ett 100-årsregn utan att vatten blir stående på ytan.

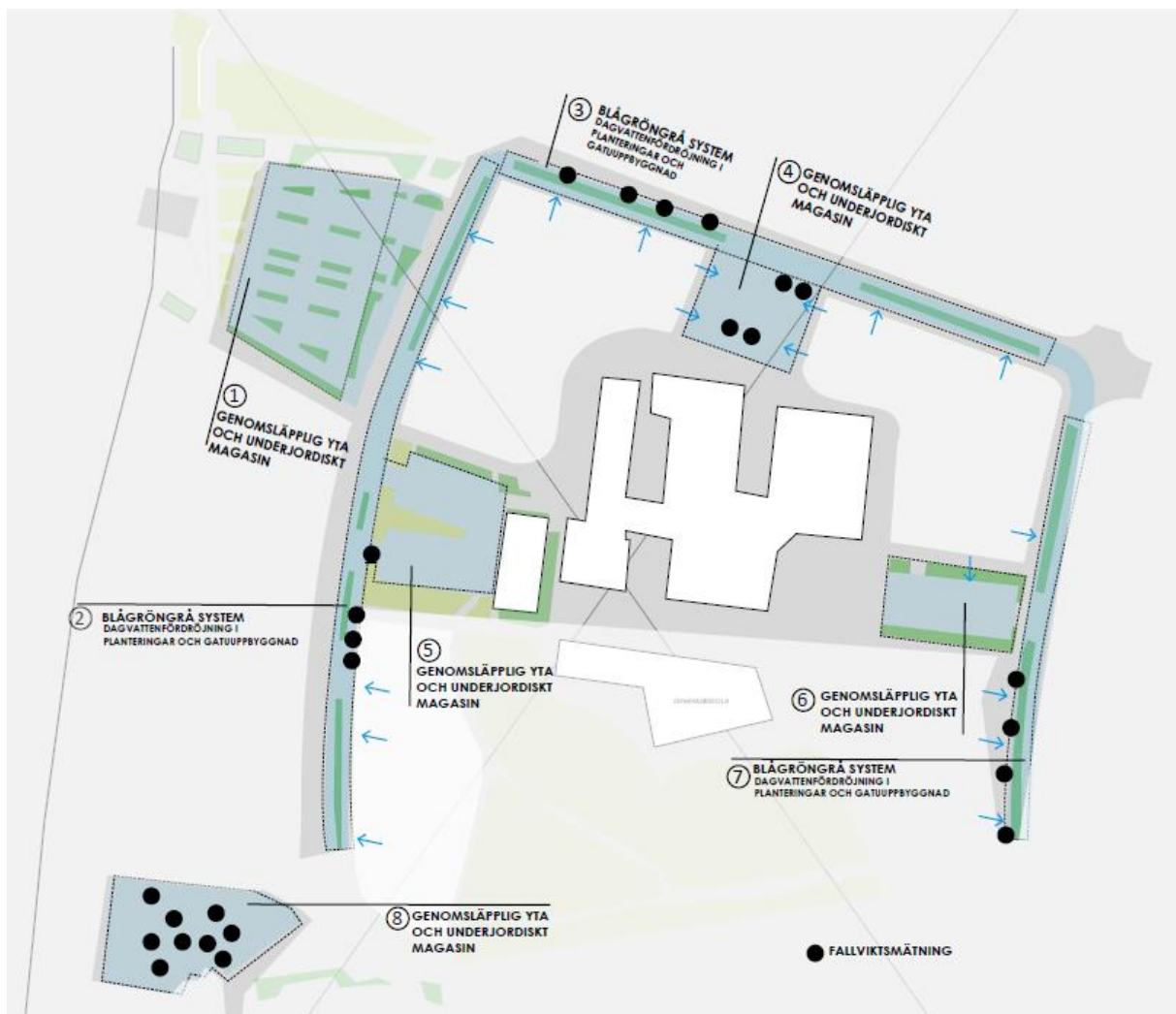
Ett 100-årsregn med varaktighet i 10 minuter motsvarar intensiteten ca 175 mm/h enligt Figur 5-5. Eftersom nederbörd från intilliggande tät hårdgjord yta (790 m²) avleds till de dränerande ytorna (525 m²) dränerande beläggning behöver "ekvivalent nederbördsintensitet" beräknas enligt Figur 5-7. För Camus Vellinge ger detta "ekvivalent nederbördsintensitet" på ca 440 mm/h (utan klimatfaktor) respektive ca 550 mm/h (med klimatfaktor 1,25).

Tabell 5-2 Resultat av infiltrationsmätning från Campus i Vellinge

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



Figur 5-12 Gräsarmeringssten Drain (Benders) från Campus i Vellinge.



Figur 5-13 Översikt över Campus i Vellinge. Svarta punkter anger position för fallviktsmätningar. Infiltrationsmätning gjordes på yta 8.

6. SAMMANFATTNING

6.1. Bärighet – fallviktsmätning

Fallviktsmätning har utförts i några kommuner för att undersöka bärighet på BGG-konstruktioner med öppet förstärkningslager (Rosendal i Uppsala, Campus i Vellinge, Munka-Ljungby i Ängelholms kommun och Jem & Fix i Vara).

I Rosendal uppmättes ingen signifikant skillnad i ytmodul för BGG-konstruktioner med öppet förstärkningslager (22/90), jämfört med referenskonstruktioner med traditionellt förstärkningslagermaterial (0/90). Det uppmättes heller ingen större skillnad mellan ytorna från etapp 2 som har ett bundet bärlager och ytorna från etapp 1 med obundet bärlager. Det är därmed oklart om det bundna bärlagret ger en ökad styvhet.

Högst ytmodul uppmättes på ytan som inte var färdigställd och där mätning gjordes direkt på det bundna bärlagret. Eventuellt kan andra platsspecifika faktorer påverka som t.ex. mängden arbetsfordon som packar ytan och packningsutförande spela in och öka ytmodulen. 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.

Inte heller i Campus i Vellinge kunde någon signifikant skillnad mellan styvhet på öppna förstärkningslager och traditionella förstärkningslagermaterial detekteras. Däremot uppmättes jämförelsevis högre ytmoduler på referensytorna. På referensytorna var asfaltlagret relativt tjockt (105 mm) jämfört med gräsarmeringsstenen (70 mm). Referensytornas höga ytmodul antas bero på högre styvhetstillskott från asfaltbeläggningen jämfört med ytorna med gräsarmeringssten.

I Munka-Ljungby testades enbart BGG-konstruktioner (öppna förstärkningslagermaterial) med asfaltbeläggning och referenskonstruktioner med traditionella förstärkningslager. Mätningarna gav något lägre styvhet för öppna förstärkningslager jämfört med traditionella förstärkningslagermaterial. I Munka-Ljungby användes relativt ensgraderade öppna förstärkningslagermaterial (100 mm 16/32 och 400 mm 32/90). Erfarenhetsmässigt sjunker styvheten något ju mera ensgraderat materialet är. Detta kan ha bidragit till den något lägre styvheten för det öppna förstärkningslagermaterialet. Ytterligare uppföljning och analys av deflektionsprofiler behövs dock för att kunna fastställa detta med säkerhet.

Mätningarna i Vara uppvisade något större variation mellan individuella mätpunkter jämfört med mätningar från andra anläggningar. Framför allt mätpunkt 22 visade avvikande värden. Frånsett denna mätpunkt, ligger genomsnittlig ytmodul i paritet, eller möjligtvis något under, motsvarande värden från andra referensanläggningar. Ingen skillnad i bärighet mellan BGG-konstruktionerna och referensen med traditionell asfaltkonstruktion kunde detekteras.

Sammanfattningsvis kunde ingen signifikant skillnad i styvhet mellan öppna- och traditionella förstärkningslager påvisas mellan de olika anläggningarna. I denna studie har i huvudsak ytmodul, och i mindre utsträckning, deflektionsprofilen utvärderas. Ytmodul, beräknat från fallviktsmätningar, är ett relativt trubbigt mått på konstruktionens bärighet. Framför allt för jämförelse mellan olika konstruktioner där det huvudsakliga bärighetstillskottet kommer från olika material (t.ex. asfalt och betongsten), ger ytmodul endast en begränsad möjlighet till jämförelse.

Avslutningsvis rekommenderas att följa upp samtliga ytor efter två år, samt att förfina jämförelsen anläggningarna emellan genom detaljerad studie av uppmätt deflektionsprofil. Ytterligare uppföljning kan ge värdefull information om anläggningarnas faktiska tillståndsutveckling.

6.2. Infiltrationskapacitet

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

Beläggningens infiltrationskapacitet ska överstiga behovet över hela dess livslängd med givna drift och underhållsintervall. Behovet ges av intensitet på dimensionerande nederbörd (t.ex. 50-års regn). Med tiden sätts fogarna igen av smuts och partiklar från biltrafik och annan mänsklig aktivitet (se Figur 5-4), och successivt minskar därför fogens kapacitet att infiltrera vatten. Det är därför avgörande att beläggningens initiala infiltrationskapacitet anpassas efter förväntad igensättningen, så att den även efter 8–12 år överstiger behovet (dimensionerande nederbörd).

Mätningarna visade att aktuell infiltrationskapacitet ligger avsevärt över behovet (som lägst ca 5 ggr för Campus Vellinge och 17 ggr för Jem & Fix i Vara) att kunna infiltrera ett 100-årsregn utan att regn som faller på ytan blir stående, vilket måste anses vara ett mycket bra resultat.

Om man antar att igensättningen av ytorna i Vara och Vellinge följer normal utveckling (enligt Figur 5-4), korresponderar 2 års användning av ytan i Vara till ca 45 till 60% reduktion av infiltrationsförmågan jämfört med initial infiltrationskapacitet. Motsvarande för Campus i Vellinge är 28 till 42 % reduktion. Orsaken till den högre reduktionen i Vellinge antas bero på närhet till planteringar och annan vegetation och visuell inspektion synade relativt hög grad av grönska i fogarna.

Resultatet av mätningar med dubbelringinfiltrimeter är beroende av en rad olika faktorer vilket nödvändiggör att upprepade mätningarna på flera platser oftast är nödvändigt. Påverkande faktorer kan vara t.ex. partikelstorlek (om mätningen utförs direkt på markyta), produktformat, fogarea, ej genomgående fogar mm. Detta innebär att det är ytterst viktigt att dubbelringinfiltrimeterns ringar omsluter en representativ area av ytan. Dvs att ytan innanför ringen motsvarar samma förhållande mellan permeabel/impermeabel area som beläggningen i stort.

Antagande om att infiltrationskapaciteten följer normal utveckling (enligt Figur 5-4) kan endast verifieras med ytterligare uppföljning och mätningar, förslagsvis vart annat år. Ytterligare uppföljning kommer ge värdefull information om anläggningarnas faktiska tillståndsutveckling samt hur infiltrationskapaciteten förändras med tiden för svenska förhållanden.

REFERENSER

AMA Anläggning 20. Svensk Byggtjänst

Avledning av dag-, drän- och spillvatten. Funktionskrav, hydraulisk dimensionering och utformning av allmänna avloppssystem. Svenskt Vatten AB. Publikation P110. ISSN 1651-4947 (2016).

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).

Design and construction of concrete block permeable pavements, edition 7. Interpave (2018), L534:L217. Published by Interpave, www.paving.org.uk.

Forskning för ett transformativt och hållbart samhällsbyggande, Strategisk agenda för det nationella forskningsprogrammet för hållbart samhällsbyggande. FORMAS (2021).

Fördröjning av dagvatten med dränerande markstensbeläggning. PROJEKTERING, UTFÖRANDE SAMT DRIFT OCH UNDERHÅLL AV MULTIFUNKTIONELLA GATURUM. Svensk Markbetong (2019). <https://svenskmakbetong.se/bocker/>

In-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement – New results. Dr Soenke Borgwardt (2015). In: International Conference on Concrete Block Pavements, ICCBP 2015.

Krav Bitumenbundna lager. TDOK 2013:0529. Trafikverket (2017).

Levande stadsrum - en handbok i Blågröngrå system, Version 3.1. Fridell, K. et. al. (2019). <https://bluegreengrey.edges.se/>

M. Mahdi Roozbahani, Rodrigo Borela and J. David Frost (2017). Pore Size Distribution in Granular Material Microstructure. MDPI Materials.

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.

Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem. Svenskt Vatten AB. Publikation P104. ISSN 1651-4947 (2011).

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.

Pervious Concrete, Reported by ACI Committee 522, ACI 522R-06 (2006).

Regnenveloppmetoden (1982). Sjöberg, A. et al. Chalmers Tekniska Högskola, Meddelande 64, ISSN 0347-8165.

SS EN 1338, Betongmarksten – Krav och provningsmetoder, SIS.

Standard test method for field measurements of infiltration rate using Double-Ring infiltrometer with sealed-inner ring. ASTM D5093 – 15.

Swedish Design Tables for Permeable Block Pavements. Shafiqur Rahman, Erik Simonsen and Fredrik Hellman, Vinnova – Utmaningsdriven innovation – Hållbara attraktiva städer (2017).

The SuDS Manual, CIRIA report C753 (2018). ISBN: 978-0-86017-760- 9. www.ciria.org.

TRVKB 10 Obundna lager, Trafikverkets Krav Beskrivnings t.ex.ter för obundna material i vägkonstruktioner, TRV 2011:083, TDOK 2011:265, Trafikverket (2011).

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

Utvärdering av vägkonstruktioners bärighet med fallviktsapparat, TDOK 2019:0463, Trafikverket (2020).

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).

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.

M. Mahdi Roozbahani, Rodrigo Borela and J. David Frost (2017). Pore Size Distribution in Granular Material Microstructure. MDPI Materials.

TRVKB 10 Obundna lager, Trafikverkets Krav Beskrivnings t.ex.ter för obundna material i vägkonstruktioner, TRV 2011:083, TDOK 2011:265, Trafikverket (2011).

Utvärdering av vägkonstruktioners bärighet med fallviktsapparat, TDOK 2019:0463, Trafikverket (2020).

Fördröjning av dagvatten med dränerande markstensbeläggning. PROJEKTERING, UTFÖRANDE SAMT DRIFT OCH UNDERHÅLL AV MULTIFUNKTIONELLA GATURUM. Svensk Markbetong (2019). <https://svenskmarkbetong.se/bocker/>

Porous pavements – Integrative studies in water management and land development. ISBN 0-8493-2670-2. Ferguson, Bruce K. (2005).