

Master Thesis  
TVVR 20/5009

# Skelettjordskonstruktioner

En undersökning av dess funktion med  
hydraulisk modellering i MIKE URBAN+

---

Carl Edström



Division of Water Resources Engineering  
Department of Building and Environmental Technology  
Lund University

# Skelettjordskonstruktioner

En undersökning av dess funktion med  
hydraulisk modellering i MIKE URBAN+

By:  
Carl Edström

Master Thesis

Division of Water Resources Engineering  
Department of Building & Environmental Technology  
Lund University  
Box 118  
221 00 Lund, Sweden

Water Resources Engineering  
TVVR20/5009  
ISSN 1101-9824  
Lund 2020  
[www.tvrl.lth.se](http://www.tvrl.lth.se)

Master Thesis  
Division of Water Resources Engineering  
Department of Building & Environmental Technology  
Lund University

Swedish title: Skelettjordskonstruktioner – En undersökning av dess funktion med hydraulisk modellering i MIKE URBAN+

English title: Structural soils – A study of its capacity with hydraulic modelling in MIKE URBAN+

Author: Carl Edström

Supervisor: Johanna Sörensen

Examiner: Rolf Larsson

Language: Swedish

Year: 2020

Nyckelord: MIKE URBAN+; skelettjord; dagvattenhantering; urban hydrologi; hydraulisk modellering

Keywords: MIKE URBAN+; structural soil; stormwater management; urban hydrology; hydraulic modelling



## Förord

Det här examensarbetet är det sista momentet på min civilingenjörsutbildning inom Väg- och Vattenbyggnad på Lunds Tekniska Högskola (LTH). Arbetet har skrivits med stöd av Norconsults VA-team och avdelningen för Teknisk Vattenresurslära vid Lunds Universitet under vårterminen 2020.

Jag vill tacka alla som varit till stor hjälp under arbetets gång. Tack till er alla som ställt upp på intervjuer och lärt mig mer om både skelettjordar och modellering. Tack till DHI för studentlicensen till MIKE URBAN+ och Maria Roldin för att du tog dig tid att svara på frågor och agera som stöd när jag skulle lära mig MIKE URBAN+. Tack till VA-teamet på Norconsult i Stockholm för all hjälp med både stöd under arbetet och skratt utanför.

Ett stort tack vill jag ge till mina handledare Johanna Sörensen på LTH och Nicolas Schoeffler på Norconsult. Stort tack Johanna för ditt stöd under arbetet med goda råd och vägledning. Stort tack Nicolas för all hjälp och stöd under arbetets gång. Allt från att gräva i arkiv till att komma med idéer och värdefull input.

Ett sista stort tack vill jag ge till min familj och vänner som varit till stort stöd under de här fem åren och förgyllt min studietid.



## **Abstract**

Urbanization with growing and denser cities in combination with climate change that is expected to produce more extreme weather requires a smart land use where several functions can be fulfilled on the same surface. An example of a multifunctional facility is structural soil that have a bearing capacity to handle loads, create favorable conditions for trees and handle stormwater with purification and delay.

In this study, interviews with municipal employees have been conducted to investigate the use of structural soil today and the division of responsibilities for them. 4 of the 5 interviewees have structural soils in their municipality. They are often planted with the health of the trees in focus, but purification and delay are also seen as secondary functions. No possible delay in skeletal soil has been considered when designing stormwater networks.

A case study with hydraulic modeling in MIKE URBAN + has been made to investigate the hydraulic capacity of structural soils and how they can reduce the load on the stormwater network with respect to peak flows, reduced volume and delay. The inclusion of structural soils results in a small reduction in peak flow, flow volume and the hydraulic grade line during the 10- and 30-year rain events. The fact that the structural soils do not give a greater reduction is considered to be because the drainage from the structural soils is too small in comparison with the total volume of the pipe.





## Sammanfattning

Urbanisering med växande och tätare städer i kombination med klimatförändring som förväntas kunna ge extremare väder kräver ett smart markanvändande där flera funktioner kan uppfyllas på samma yta. Ett exempel på en multifunktionell anläggning är skelettjordskonstruktioner som har en bärförmåga som hanterar ovanliggande laster, skapar gynnsamma förhållanden för träd och hanterar dagvatten med rening och fördröjning.

I arbetet har intervjuer med kommunanställda gjorts för att undersöka hur användningen av skelettjordskonstruktioner ser ut idag och hur ansvarsfördelningen kring dem ser ut. 4 av de 5 intervjuade har skelettjordar i sin kommun. De anläggs ofta med trädens hälsa i fokus men rening och fördröjning ses också som sekundära funktioner. Ingen eventuell fördröjning i skelettjordar har tagits i beaktning vid dimensionering av ledningsnät.

En fallstudie med hydraulisk modellering i MIKE URBAN+ har gjorts för att undersöka skelettjordskonstruktioners hydrauliska funktion och hur de kan minska belastningen på ledningsnätet med avseende på toppflöden, reducerad volym och fördröjning. Inkluderandet av skelettjordar ger en liten reduktion av flödestopp, flödesvolym samt trycklinjen vid 10- och 30-årsregn. Att skelettjordarna inte ger en större reduktion bedöms bero på att avrinningen till skelettjordarna är för liten i jämförelse med den totala volymen i röret.



# Innehållsförteckning

Förord .....	iii
Abstract .....	v
Sammanfattning .....	vii
Innehållsförteckning.....	ix
1 Inledning.....	1
1.1 Syfte.....	2
2 Teori .....	3
2.1 Träd i stadsmiljöer .....	3
2.2 Skelettjordskonstruktioner .....	4
2.3 Fördröjning .....	9
2.4 Rening.....	10
3 Metod .....	13
3.1 Intervjuer .....	13
3.2 Hydraulisk modellering av skelettjordar .....	15
3.2.1 Grundmodellen.....	17
3.2.2 Avrinningsområden.....	20
3.2.3 Soakaway .....	22
3.2.4 Brunnar, infiltrationsrör och dräneringsrör .....	26
3.2.5 Förenklingar och antaganden .....	28
3.3 Handberäkning.....	29
3.4 Känslighetsanalys .....	32
3.5 Simulering av ledningsnät .....	32
4 Resultat och analys.....	33
4.1 Intervjuer .....	33
4.1.1 Användning av skelettjordskonstruktioner.....	33

4.1.2	Ansvarsfördelning .....	35
4.2	Handberäkning.....	37
4.3	Känslighetsanalys .....	40
4.4	Hydraulisk modellering .....	43
4.4.1	2-årsregn.....	43
4.4.2	5-årsregn.....	47
4.4.3	10-årsregn.....	50
4.4.4	30-årsregn.....	54
5	Diskussion .....	59
5.1	Resultat .....	59
5.2	Modelluppbyggnad.....	62
5.3	Framtida studier .....	64
6	Slutsats .....	65
7	Källförteckning.....	67
	Bilagor.....	71

# 1 Inledning

Urbanisering med växande och tätare städer i kombination med en klimatförändring som förväntas kunna ge extremare väder kräver ett smart markanvändande där flera funktioner kan uppfyllas på en och samma yta. Ett exempel på en sådan lösning är skelettjordar som kan fungera som ett underjordiskt magasin för hantering av dagvatten samtidigt som det skapar goda förhållanden för träd att växa i hårdgjorda stadsmiljöer och ger en bärighet nog för att klara av laster från trafik (Larm och Blecken 2019). En skelettjordskonstruktion är en konstgjord anläggning som karakteriseras av en struktur med bärighet samtidigt som den har hålrum som ger utrymme till trädens rötter och kan magasinera vatten.

I dagens urbana miljöer dominerar hårdgjorda ytor som omöjliggör infiltration av dagvatten till den underliggande jorden. Det kan i sin tur leda till problem vid kraftiga regn då ledningsnätets kapacitet kan överskridas och resultera i översvämningar och förorenade vattendrag. Som en dagvattenanläggning kan skelettjordskonstruktioner fylla funktioner som rening och flödesutjämning av dagvatten när det får infiltrera ned i anläggningen. Ytterligare fördelar är att träd i urbana miljöer kan utöver sin estetiska funktion även bidra med hydrologiska fördelar där trädkronorna kan fånga upp regn samtidigt som trädens rötter kan skapa förhållanden som ökar infiltrationen (Berland et al. 2017).

Det finns idag flera olika utformningar på skelettjordskonstruktioner och tillhörande dagvattensystem men även många frågor om hur de olika utformningarna skiljer sig med avseende på deras funktion för dagvattenhantering. Den här studien avser därför att undersöka hur användandet av skelettjordskonstruktioner ser ut idag och vilken potential de har som en anläggning för dagvattenhantering.

Då dagens dagvattensystem i regel modelleras konservativt utan specifika detaljer såsom skelettjordskonstruktioner, kan det även vara av relevans att studera hur stor påverkan inkludandet av skelettjordskonstruktioner har på modellens resultat och om det kan finnas behov att skapa noggrannare modeller.

## 1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet kan delas in i två delar där den första är att genom intervjuer med personer på kommuner klargöra hur skelettjordskonstruktioner används idag, hur deras uppbyggnad ser ut och hur ansvarsfördelningen kring dem ser ut. Den andra delen består av att genom modellering i MIKE URBAN+ undersöka skelettjordskonstruktioners hydrauliska funktion och om de kan minska belastningen på ledningsnätet med avseende på toppflöden, reducerad volym och fördröjning.

Följande frågeställningar har använts för att uppnå detta syfte:

- Hur ser befintliga skelettjordskonstruktioner ut idag och vilka är de kritiska faktorerna för dess funktion som en dagvattenanläggning?
- Med vilket syfte anläggs skelettjordskonstruktioner och hur ser ansvarsfördelningen ut kring dem?
- Vilken påverkan på ledningsnätet har anläggandet av skelettjordskonstruktioner med avseende på toppflöden, reducerad volym och fördröjning?

## 2 Teori

### 2.1 Träd i stadsmiljöer

Med tidens urbanisering och förtätning av städer har även förhållandena för stadens träd försvårats. Asfalterade vägar och gator täcker stor del av städerna och under ytan dras ledningar genom staden. Detta förhindrar rötternas utbredning och minskar dess förutsättningar för att få tillgång till vatten och luft som de behöver. Ett för litet utrymme för trädens rötter att växa kan påverka både trädets utveckling samt skada markbeläggningar och ledningar i marken då rötterna tränger sig upp genom beläggningar och in i ledningsgravar (Alvem & Embrén 2017).

Träd i sig kan bidra med flera ekosystemtjänster som bland annat dess hydrologiska funktion till stadsrummet (Bartens et al. 2008). Hållbar dagvattenhantering och blå-grön infrastruktur strävar i många avseenden till att återskapa de förhållanden som förändrats med fler hårdgjorda ytor och som rubbat den hydrologiska cykeln. Anläggandet av träd i stadsmiljöer hjälper till att återställa den funktionen genom flera processer. Trädkronans förmåga att fånga upp och hålla vatten vilket kallas interception är en (Elliott et al. 2018). Den nederbörd som fångas upp i trädkronan kan därefter evaporeras och bidrar därmed inte till någon avrinning. Evaporationen förekommer i större grad under sommarmånaderna med varmare temperatur, då är även vanligtvis trädkronan större (Berland et al. 2017). Det regn som inte hålls av trädkronan och rinner ned längs stammen kallas för stamflöde. Stamflödet rinner ned till trädgropen och infiltrerar där via stammen (Bartens et al. 2008).

I hårdgjorda stadsmiljöer överstiger potentialen för transpiration hos träd ofta den hos andra hållbara dagvattenåtgärder med jämförbar storlek. En anledning anses vara då trädkronan ofta kan täcka en större yta än dess motsvarande anläggningsyta. (Thom et al. 2020). Då jorden kring träden i stadsmiljöer kan kompakteras av ovanliggande beläggning kan en utbredning av ett träds rotsystem i vissa fall skapa ett ökat utrymme för infiltration att ske (Bartens et al. 2008). Rötternas uppsugningsförmåga kan skilja sig mellan arter men tenderar ofta att vara god och kan därmed bidra till en minskad dräneringsvolym (Berland et al. 2017).



Hur en kompakterad yta vid trädgruppen påverkar infiltrationsförmågan har visats av att stadsträd som hade mindre staket eller skydd uppvisade en högre infiltrationsförmåga än träd utan. Skyddet ansågs hindra fotgängare från att gå på jorden vilket därmed resulterade i att den blev mindre kompakterad än hos träd utan skydd. Den infiltrerande förmågan och funktionen för att hantera dagvatten hos ett träd och dess trädgröp i stadsmiljö kan därför till viss del härledas till dess design och underhåll (Elliott et al. 2018). I situationer när det planterade trädets trädkrona är förhållandevis liten kan det vara trädgruppen och dess infiltrationsförmåga som är drivande för reducering av flöde (Armson, Stringer och Ennos 2013).

## 2.2 Skelettjordskonstruktioner

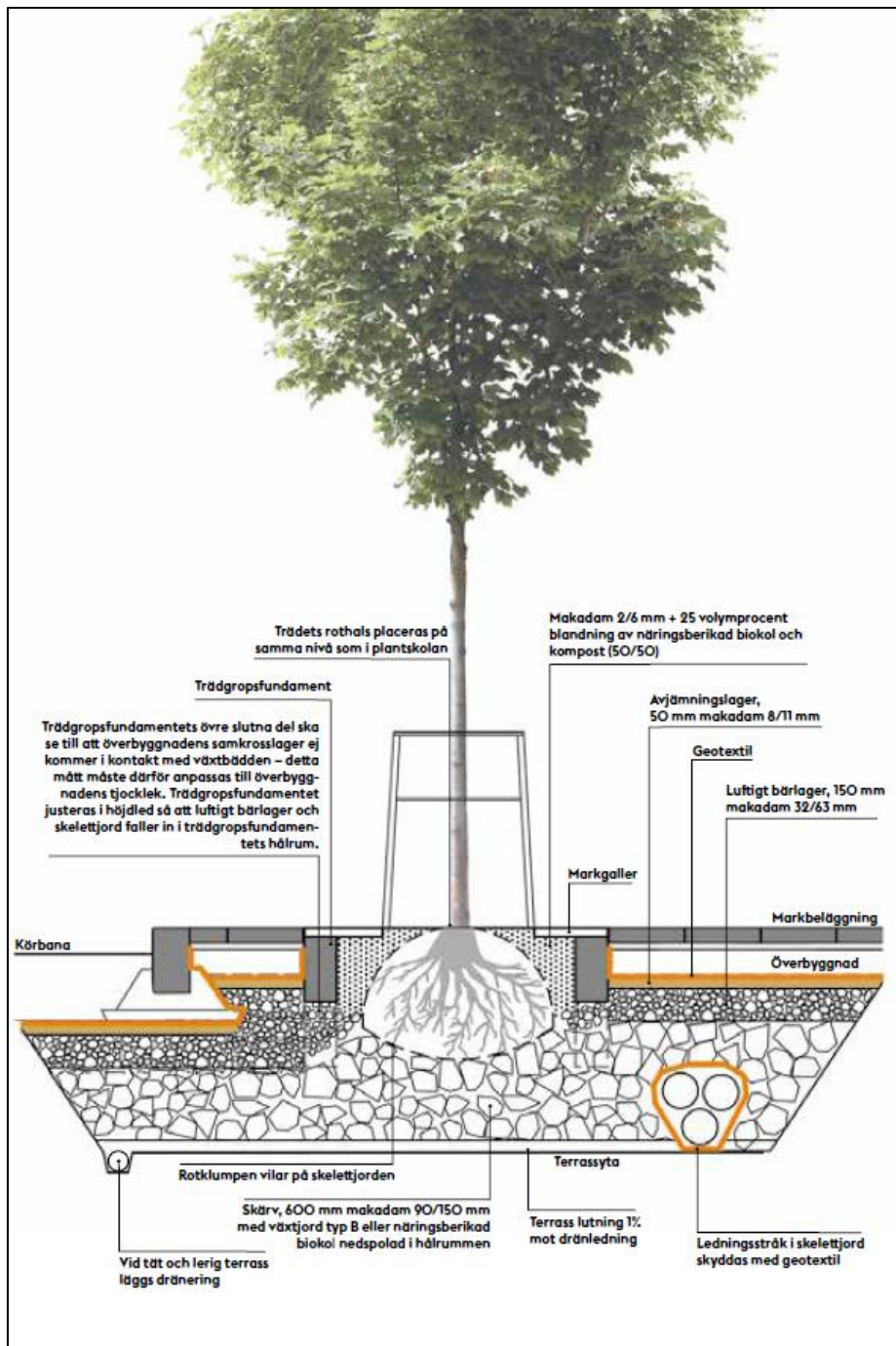
I Stockholm upptäcktes det hur urbaniseringen hade påverkat och skadat träd då Trafikkontoret utförde en statusbedömning av gatuträd 2001. Där upptäckte de att två av tre träd i Stockholms innerstad var döda eller döende. Detta initierade ett arbete för att hitta lösningar som skulle förbättra trädens förhållande i staden och har lett till den utformning av skelettjordskonstruktioner för träd och växtbäddar som finns i Stockholms stad idag (Alvem & Embrén 2017).

Det finns i dagsläget ett antal olika utformningar på skelettjordskonstruktioner i Sverige. Men vad de alla har gemensamt och vad som principiellt kan karakterisera en skelettjordkonstruktion är dess uppbyggnad med en porös struktur som ger utrymme till trädens rötter och en bärighet som motverkar kompaktion vid ovanliggande belastning. Skelettjordskonstruktioner bedöms ha en bärförmåga tillräcklig för att hantera laster som gång och cykelbanor samt upp mot trafikclass 1 (Hellman 2017). Trafikclass 1 motsvarar en tillåten belastning på maximalt 500 000 standardaxlar eller förenklat enligt Svensk Markbetong, högst 1 000 personbilar per dag (Svensk Markbetong, 2019).

De främsta problemområdena där skelettjordskonstruktioner skapar bättre förhållanden för träd i stadsmiljön är vattentillgången, syresättningen och gasutbytet samt det ökade utrymmet för rötterna.

I stadsmiljöer som ofta domineras av hårdgjorda ytor med snabb avrinning skapar en skelettjordskonstruktion ett underjordiskt magasin där dagvatten kan samlas och förse växtbäddens rötter med vatten (Alvem & Embrén 2017). Att få trafikdagvatten lett till skelettjordar ansågs av Alm (2005) ha gynnat trädens hälsa då dess hälsa undersöktes okulärt. Det är dock av vikt att se till att skelettjorden dräneras på det vatten som rötterna inte absorberar, vilket annars kan leda till syrebrist för rötterna. Det undviks genom att låta vatten exfiltrera ut till omkringliggande mark eller att ansluta ett dräneringsrör som dränerar skelettjorden (Alvem & Embrén 2017).

Den metod som ofta förekommer vid anläggandet av växtbäddar idag är skelettjord enligt den så kallade "Stockholmsmodellen". Dess uppbyggnad består av att skärva i fraktionen 90/150 mm läggs ut och att växtjord spolats ned i hålrummen med en vattenstråle. För att få en fast och stabil struktur upprepas proceduren med flera lager som packas tills den önskade höjden är uppnådd. En tjocklek mellan 60–100 cm är ofta förekommande. Ovanpå skärven läggs ett lager som kallas luftigt bärlager och består av makadam 32/63 mm. Det luftiga bärlagret har en porösare struktur än det underliggande lagret och det är där som den främsta magasineringen av vatten sker. Infiltration ned i det packade skärvlagret kommer att ske allt eftersom men med en långsammare hastighet än hos det luftiga bärlagret. Då träd är anlagda i en hårdgjord yta anläggs en luftningsbrunn med volym på 60 liter per träd för att förse trädens rötter med syre och vatten. Via dem och det luftiga bärlagret transporteras det sedan till trädets rötter (Alvem & Embrén 2017).



Figur 1 Skelettjord enligt Stockholmsmodellen Alvem, B-M. & Embrén, B (2017).

Den ovan beskrivna utformningen är av själva skelettjordskonstruktionen som utgör den hållfasta grundkonstruktionen och ytterligare detaljer såsom trädgrop, avskiljande lager och beläggning tillkommer sedan för ett träd i stadsmiljö. Ett exempel på det kan ses i Figur 1 ovan.

Strukturen hos en skelettjordskonstruktion ger goda förhållanden för rotsystemet att växa. Det har i sin tur visat ge upphov till en minskning av skada på en permeabel beläggning när den anlagts ovanpå ett lager med makadam. Det porösare övre lagret och den permeabla asfalten ansågs skapa goda förhållande med vatten och syresättning vilket gjorde att rotsystemet inte sökte sig upp till ytan då makadamlagret var 300 mm (Lucke och Beecham 2019).

I skelettjordsanläggningar är det vanligt att blanda in material i växtbädden för att förbättra jordens egenskaper och näringshållande förmåga. Näringsberikad biokol, pimpsten och kompost är några jordförbättrande material som förekommer i växtbäddar och där biokol och pimpsten har en god strukturihållande förmåga. Just biokol i växtbäddar har använts mycket vid anläggning av växtbäddar i Stockholm där dess förmåga att förbättra jordens struktur, vatten- och näringshållande förmåga samtidigt som det går att produceras lokalt har framhävts (Alvem & Embrén 2017). Biokol produceras genom processen pyrolys där förbränning sker under syrefattigt förhållande med hög temperatur. Tillsats av biokol i anläggningar för hållbar dagvattenhantering kan ge upphov till ökad reningsförmåga, förbättra de vattenhållande egenskaperna för magasinering och öka näringsupptagningsförmågan hos växter. Tillsatsen av biokol i ett poröst medium ger inte upphov till en reducerad hydraulisk konduktivitet och en funktion för fördröjning av dagvatten kan därmed bibehållas (Mohanty et al. 2018). Vid tillsats av biokol till skelettjorden kan det rekommenderas att även gödsel tillförs för att undvika att biokolet binder till sig näringsämnen. Det kan dock innebära en frigörelse av näringsämnen i vatten vilket motverkar dess reningsfunktion. Dagvatten kan anses innehålla tillräckligt med näringsämnen i sig för att motivera exkluderandet av gödsel och biokol kan då bidra till en ökad reningsfunktion när det binder näringsämnen (Larm & Blecken 2019).

En annan modell för skelettjordskonstruktioner är växtbädd med kolmakadam. Där har skelettjorden med skärv och nedspolad jord ersatts av ett lager med kolmakadam med kornstorlek 32/90 mm som blandats med näringsberikad biokol och kompost. Ur en dagvattensynpunkt ger detta en större magasineringensvolym då kolmakadam har en porösare struktur likt det luftiga bärlagret. Det är även enklare att anlägga kolmakadam än skelettjorden då processen med att packa och spola ned jord i omgångar tar tid och kräver mer arbete (Alvem & Embrén 2017).

Blågröngrå system (BGG-system) är en modell som är framtagen av Edge (2020) och dess uppbyggnad kan liknas vid Stockholms stads kolmakadam. Där är det ett öppet förstärkningslager som med sin porösa uppbyggnad av makadam möjliggör magasinering av dagvatten, skapar goda förhållanden för växtbäddar samt kan hantera ovanliggande trafikbelastning. Anläggningsmetoden är testad upp till trafikklass 2 eller bärighetsklass 1 och kan därmed belastas av ovanliggande last som motorfordon. Den kan även anläggas under gång- och cykelbanor i hårdgjorda stadsmiljöer. Den porösa uppbyggnaden, 30–40 procents porositet, ger hög hydrauliska konduktivitet och god genomströmning i anläggningen (Döse & Schouenborg 2017). Men för att utnyttja dess fulla magasineringenskapacitet kan flödesregulatorer installeras som styr flödet till det konventionella ledningsnätet. Utan reglering av flödet ut ur BGG-systemet minskar uppehållstiden för vattnet i magasinet då vattnet i princip kan flöda rakt genom systemet. Vilket flöde som bör väljas för flödesregleringen är beroende på vilket regnevent som systemet ska dimensioneras för och vilken funktion som systemet vill uppnå (Edge 2020). Val av material för konstruktionen bör också väljas efter vilken funktion som den dränerande konstruktioner primärt ska uppfylla. Exempel på olika funktioner är bärighet, gynnsamma förhållanden för träd och växtlighet samt ta hand om dagvatten för fördröjning och magasinering (Hellman 2017).

För beläggningar är tjällyft en företeelse som vill undvikas. En jords risk för tjällyft kan kopplas till jordens kapillaritet och dess kapillära stighöjd. Jordar med en kornstorlek och därmed även porstorlek som möjliggör en hög stigning av vatten genom kapillär uppsugning anses vara mest tjälfarliga. Exempel på det är siltrika jordar (Larsson 2008). Med uppbyggnaden hos ett BGG-system bedöms de stora porerna skapa svåra förhållanden för kapillär stigning och det anses därmed inte finnas risk för tjällyftning (Edge 2020).

## 2.3 Fördröjning

Förutom att bevattna rotsystemet när dagvattnet leds ner i skelettjorden sker dessutom en fördröjning av dagvattenflödet när dagvatten samlas i det underjordiska magasinet istället för att rinna direkt till ledningsnätet (Alvem & Embrén 2017).

Larm & Blecken (2019) anger att för skelettkonstruktioner är potentialen för flödesutjämning stor vid låga flöden men liten eller ingen vid dimensionerande flöden enligt publikationen P110 från Svenskt Vatten eller extrema flöden. Det är främst förmågan att transportera in vatten i konstruktionen som begränsar funktionen vid dimensionerande flöden och inte anläggningen i sig. Den slutsatsen drogs även av Alm (2005) som bedömde att det inte var någon risk att själva skelettjorden blev mättad där porvolymen fylls upp av vatten. Det som däremot ansågs vara begränsande för skelettjordens hydrauliska funktion var hur snabbt vatten kunde ledas in via fördelningsröret. Där bedömdes även att det inte är fördelningsledningen i sig som begränsar infiltrationen, utan materialet som omger fördelningsledningen. Vid beräkningar med typregn och inkludering av den fördröjning som kan ske i brunnen och fördelningsröret skulle skelettjorden klara av att fördröja ett 10-årsregn med 27 minuters varaktighet. Om varaktigheten översteg 27 minuter skulle vattennivån i brunnen överstiga dess djup och vatten rinna ut på marken.

Larm & Blecken (2019) anger att just flödeskapaciteten hos intagsbrunnar och infiltrationsrör är svårt att säkerställa och att det därmed är svårt att avgöra hur god fördröjningspotentialen är hos en skelettjord. Det är baserat på en skelettkonstruktion med luftigt bärlager ovanpå ett lager med makadam och nerspolad jord. Då skelettjordskonstruktionerna tillförs vatten genom en luftningsbrunn eller infiltrationsrör finns en risk att finare sediment sätter igen hål och förhindrar infiltrationen. Även (Szota et al. 2019) bedömer att i hårdgjorda ytor där vatten leds via brunnar med galler är det inloppet som har stor påverkan på anläggningens funktion. Om inloppet blockeras av samlat material som exempelvis löv kan kapaciteten för dagvattenhantering påverkas märkbart. Det är därför av stor vikt att underhåll sköts med spolning och tömning av sandfång för att säkerställa en god funktion. För skelettjordskonstruktionen uppbyggd enligt stockholmsmodellen sker fördröjningen i det porösa luftiga bärlagret.

Ytterligare volym för fördröjning kan skapas genom utformning med en nedsänkt växtbädd och träden i sig kan bidra genom absorption och avdunstning av vatten (Larm & Blecken 2019).

## 2.4 Rening

Skelettjordskonstruktioner bedöms även ha potential för rening av dagvatten till såväl låg som hög grad. Det är främst dess potential att fastlägga grövre partiklar som anses vara god. En skelettjordskonstruktion är dock en platsspecifik anläggning och funktionen hos en konstruktion kommer därmed att skilja sig beroende på dess plats och utformning (Larm & Blecken 2019). Även vilka krav som finns för rening av dagvatten kan skilja sig mellan platser. Stockholms stad har en åtgärdsnivå vid ny- och större ombyggnation för att förtydliga vilka krav på dagvattenåtgärder som ska uppfyllas. Den anger att dagvatten från hårdgjorda ytor på kvartersmark ska ledas till dagvattenanläggningar för lokalt omhändertagande där rening och fördröjning kan ske. Systemen ska dimensioneras med kapacitet tillräcklig för att hantera 20 mm nederbörd. Då anses anläggningen ha kapacitet att rena 90 procent av årsvolymen. (Stockholms stad 2016). Förutom att vara ett förtydligande av krav på åtgärder för dagvattenhantering är förhoppningen att åtgärdsnivån ska minska föroreningsbelastningen via dagvattnet. Föroreningar i dagvattnet som belastar recipienten är fosfor som orsakar övergödning, organiska miljöföroreningar och tungmetaller. Anledningen till att fokuset är riktat till nybyggnation är att inkludandet av dagvattenåtgärder i tidigt stadiet vid planering ger större möjligheter att genomföra kostnadseffektiva åtgärder. I ett befintligt område är möjligheterna för samma åtgärder begränsade (Andersson et al. 2016).

Trots avsaknad av vetenskapliga studier av reningsfunktion antas sediment och partikelbundna föroreningar kunna avskiljas i skelettjordar. Likt funktionen för fördröjning anses reningsfunktionen ökas vid utformning med nedsänkt konstruktion samt med infiltration genom en växtbädd (Larm & Blecken 2019). För skelettjordskonstruktioner som är utformade med en uppbyggnad likt Stockholms stads kolmakadam eller ett BGG-system kan dess funktion jämföras med funktionen hos ett makadamdike.

Där bedöms potentialen för rening av sediment och partikelbundna föroreningar vara god medan den porösa strukturen ger en mindre förmåga att ta hand om lösta föroreningar (Larm & Blecken 2019). För dagvatten från trafik är metaller en av de ofta förekommande föroreningarna (Naturvårdsverket 2017). I Sverige saltas ofta vägar för att motverka is och halka. Det kan i sin tur medföra att träd och skelettjordskonstruktioner som är anlagda i anslutning till väg utsätts för påfrestningar om vägsaltet når dem via dagvattnet. Om vägsaltet sen blir kvar i jorden och inte sköljs bort med snösmältning och vårregn kan det finnas en risk för negativ påverkan på träden (Ordóñez-Barona, Sabetski, Millward och Steenberg 2018).

Vid dimensionering av dagvattenanläggningar används ett dimensionerande flöde som kan skilja sig beroende på vilket det primära syftet för anläggningen är. Om konstruktionen är anlagd med rening som främsta funktion används ofta ett lägre dimensionerande flöde än om anläggningen dimensioneras för avledning och/eller fördröjning. Detta då majoriteten av föroreningstransporten per år sker vid mindre regn. Ytterligare en skillnad vid dimensionering för rening jämfört med fördröjning är att anläggningens funktion baseras på andelen omhändertagen årsvolym. En större andel omhändertagen årsvolym innebär att mer av den årliga avrinningen behandlas och renas vid den dimensionerade anläggningen. Då anläggningarna dimensioneras efter mindre regn innebär det att kapaciteten överskrids vid större regn och att vatten då bräddas utan att rening sker (Larm & Blecken 2019).





### 3 Metod

Detta arbetes undersökning av skelettjordskonstruktioner har delats upp i två delar, en där intervjuer med kommunanställda har utförts och en med hydraulisk modellering i MIKE URBAN+. De två delarnas utförande redovisas här under respektive del i metoden och dess resultat under respektive del under resultat.

#### 3.1 Intervjuer

Skelettjordskonstruktioner är multifunktionella anläggningar som kan vara önskvärda i städer där ytorna är begränsade. Men en multifunktionell anläggning kan också innebära problem om det finns osäkerheter kring vem som ansvarar för vad när det är flera avdelningar på kommunen som är involverade i de olika funktionerna. För att undersöka hur den befintliga situationen kring skelettjordskonstruktioner ser ut i kommuner har intervjuer gjorts med kommunanställda som har en koppling till användandet av skelettjordskonstruktioner.

Intervjuerna har utförts via samtal över telefon och mejl. Strukturen på intervjuerna har utgått från ett antal frågor där den intervjuade har fått utveckla och följdfrågor ställts. Då intervjuer utfördes på telefon skickades frågorna i förhand för att den intervjuade skulle hinna läsa igenom dem och förbereda sig. Fem personer från olika kommuner och med en variation av yrkestitlar intervjuades. En sammanställning av dessa kan ses i Tabell 1 nedan.

Tabell 1 Sammanställning av de intervjuade.

Person Nr.	Kommun	Titel
1	Stockholms stad	Miljöspecialist
2	Nacka	Dagvattenspecialist
3	Malmö stad	Landskapsarkitekt
4	Alingsås	Stadsträdgårdsmästare
5	Haninge	Dagvatteningenjör

Frågorna som ställdes till de intervjuade var:

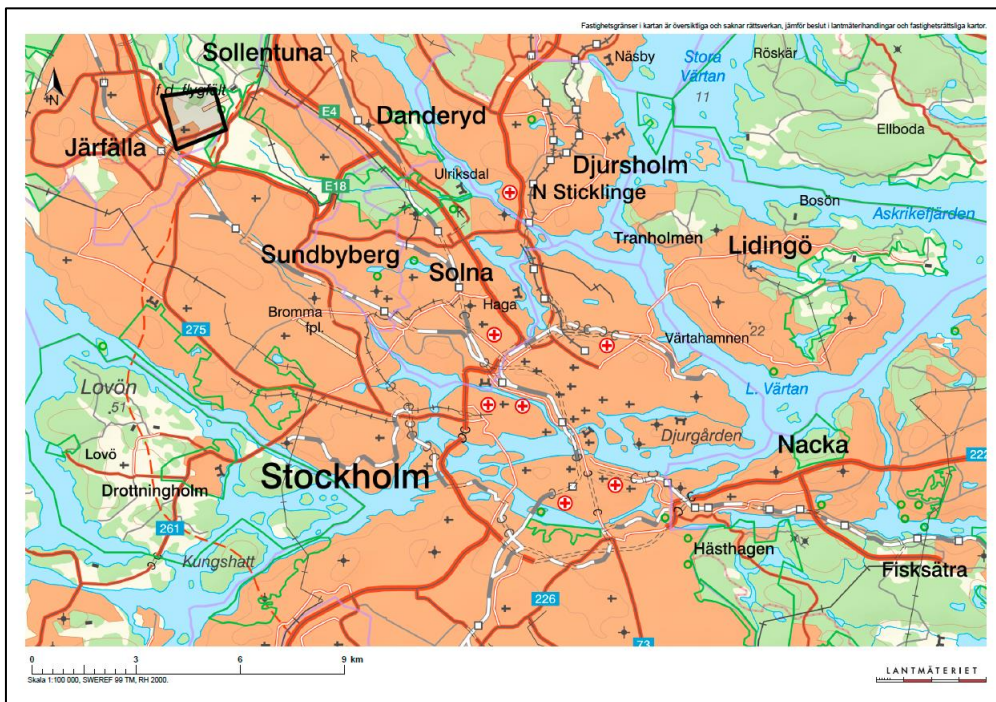
1. Har ni några skelettjordar i er kommun?

2. Hur är skelettjordarna utformade? Har ni spolat ned tillsatsmaterial i dem?
3. Vilket har det primära syftet med skelettjordarna varit vid planering? Till exempel skapa gynnsamma förhållanden för träd, rening av dagvatten eller fördröjning?
4. Hur ser ansvarsfördelningen ut i er organisation när det gäller hantering av dagvatten med skelettjordar? Till exempel fördelning mellan VA och trafikkontor?
5. Vilken enhet ansvarar för driften av luftningsbrunnarna/sandfången, infiltrationsrören och dräneringsrören?
6. Har VA-enheten något ansvar att säkerställa skelettjordars fördröjningsfunktion? Till exempel drift av utlopp och kontroll igensättning?
7. Har delar av dagvattenledningsnätet och/eller nedströms liggande fördröjningsåtgärder dimensionerats utifrån preliminär fördröjning i skelettjordar?
8. Har ni problem med igensättning av skelettjordar?
9. Anser ni att det finns problematik med den ansvarsfördelning som ni har idag?

Det sammanställda resultatet från intervjuerna presenteras i kapitel 4.1 Intervjuer.

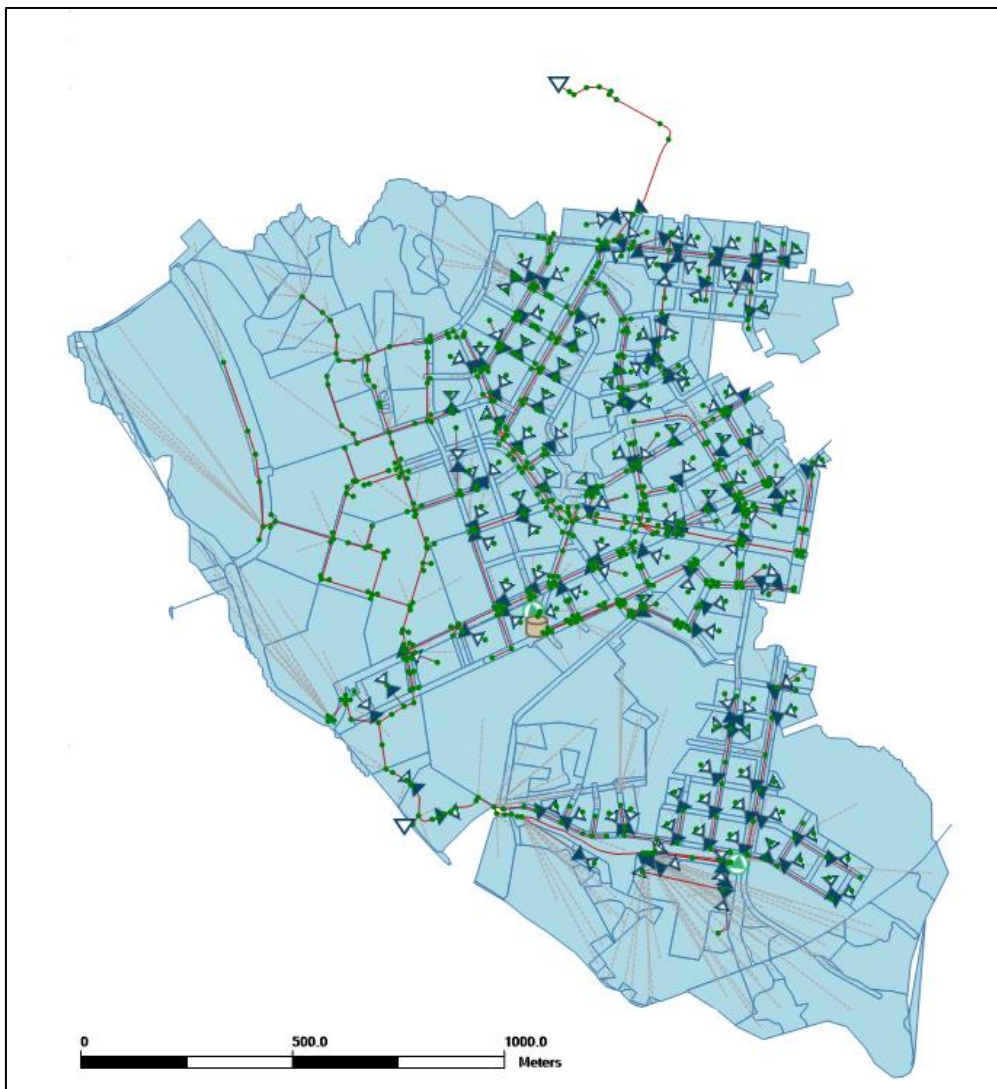
## 3.2 Hydraulisk modellering av skelettjordar

För att undersöka den hydrauliska kapaciteten hos skelettjordar och hur de kan påverka belastningen på ledningsnätet har en fallstudie gjorts. Studien har gjorts för ett område i Barkarbystaden, som är en ny stadsdel i Järfälla kommun, norr om Stockholm. Stadsdelens placering kan ses i Figur 2 nedan och markeras av den svarta rutan i det övre vänstra hörnet.



Figur 2 Karta med placering av Barkarbystaden.

En befintlig modell som är uppbyggd i programvaran MIKE URBAN (MU) från DHI erhöles från Norconsult, Tyréns samt Järfälla kommun. Modellen har sedan importerats till den nyare programvaran MIKE URBAN+ (MU+), också från DHI, för denna studie. Då den befintliga modellen, som kan ses i Figur 3, täcker hela stadsdelen har en avgränsning gjorts till att begränsa studien till att placera skelettjordar i en gata på den norra delen av Barkarbystaden där de tar hand om trafikdagvatten från gatan.



Figur 3 Den fullständiga modellen för Barkarbystaden i MIKE URBAN+.

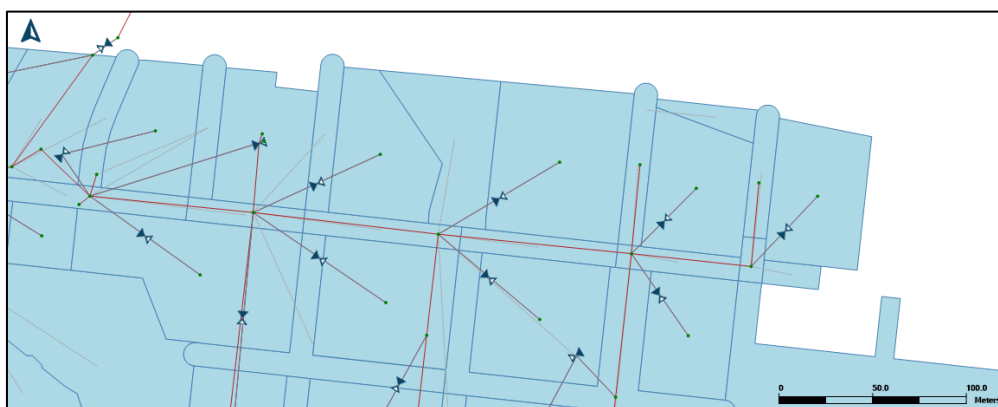
Den delen av stadsdelen har ännu inte blivit bebyggd och det finns därför ingen mätdata att tillgå därifrån. Handberäkningar för hur den tilltänkta skelettjordskonstruktionen ska fungera och för att ha något att jämföra modellens resultat med har därför gjorts. Studien är därmed baserad på ett möjligt scenario där skelettjordskonstruktioner har anlagts längs en gata på knappt 400 meter.

Skelettjordskonstruktionerna som tillämpats i studien har baserats på en typritning för träd i hårdgjord yta med kolmakadam från Stockholms stad (se Bilaga 1) samt Edges (2020) handbok för BGG-system. Vatten leds där ner i skelettjordskonstruktionen via brunnar och infiltrationsrör. Skelettjordskonstruktionen dräneras sedan med ett dräneringsrör som är placerat 20 cm över skelettjordens botten och kopplat till ledningsnätet med en flödesreglering. En mer detaljerad beskrivning av modellens uppbyggnad följer i avsnitten här nedan.

För att undersöka hur inkluderandet av skelettjordskonstruktioner påverkar belastningen på ledningsnätet har simuleringar med fyra CDS-regn (2-, 5-, 10- och 30-årsregn) gjorts för både med och utan skelettjordskonstruktioner.

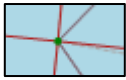
### 3.2.1 Grundmodellen

För att simulera skelettjordars hydrauliska kapacitet och påverkan på ledningsnätet behövdes ett antal justeringar och adderingar göras i den befintliga modellen. Grundscenariot för studieområdet i den erhållna modellen kan ses i Figur 4 nedan och är uppbyggd av noder som representerar brunnar, länkar som representerar ledningsnät med rör och en damm i det nordvästra hörnet, avrinningsområden och dess kopplingar till noder, samt överfall som representerar en lokal fördröjning och magasinering på kvartersmark.



Figur 4 Grundscenariot för studieområdet.

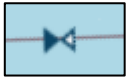
## Teckenförklaring



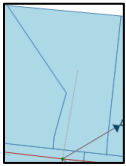
Brunn (nod)



Rör och kanal (länk)



Lokal fördröjning och magasinering (överfall)

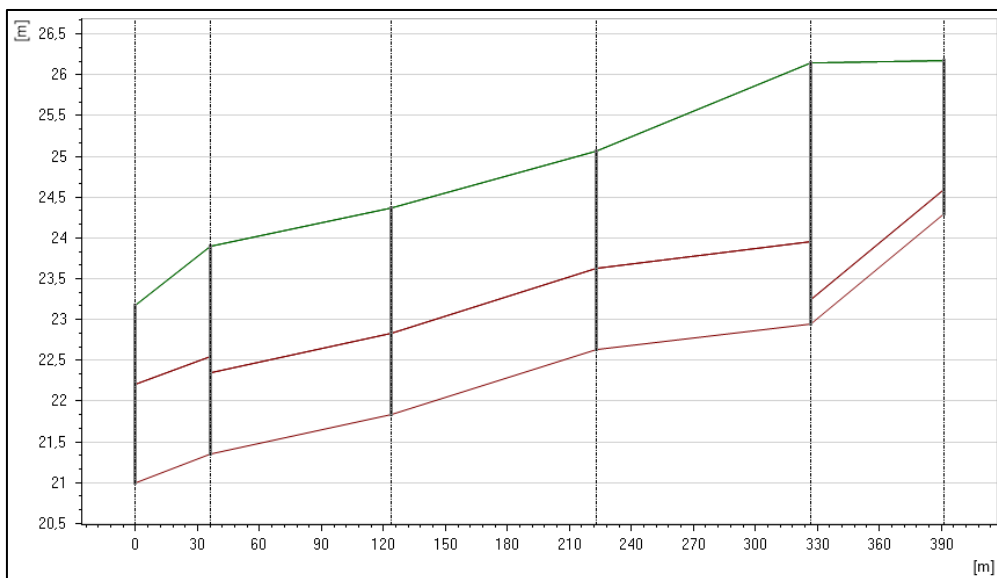


Avrinningsområde (blåa streck) och dess koppling till nod (svag röd linje)

Huvudledningen som går längsmed gatan får dagvatten från fyra olika källor:

1. Avrinning från gatan
2. Kvartersmark
3. Anslutande ledningar
4. Avrinning från närliggande gator

Det är enbart tillskottet från avrinning från gatan som skelettjordarna i denna studie kommer att hantera.



Figur 5 Profil av ledningen i gatan i grundscenariot.

En profil av ledningen i gatan kan ses i Figur 5 ovan och separeras i tre delar. Längst till höger är ett cirkulärt rör uppströms med diametern 300 mm, i mitten är ett segment på tre cirkulära rör där diametern är 1000 mm och till vänster är ett cirkulärt rör nedströms med diametern 1200 mm. Till noderna mellan rören i figuren ansluter ledningar från tvärgator och kvartermark. För att förklara den anmärkningsvärda dimensionsändringen från 300 mm till 1000 mm ansluter två rör från tvärgator vid den noden, varav ett har storleken 600 mm. Rören i de tre delarna har samma materialegenskaper där de har ansatts till att vara av betong med ett fördefinierat värde i MU+ för rörets råhet på  $M = 70 \text{ m}^{(1/3)}/\text{s}$ . Det värdet används sedan för att beräkna friktionsförlusterna i röret med Manning's ekvation för friktionsförluster.

I profilen finns även sex brunnar med varierande djup och en diameter på 1 meter. Det finns ett flertal olika inställningar att välja för beräkning av energiförluster i brunnar men "Weighted Inlet Energy" rekommenderas för de flesta vanliga brunnar (Blomquist, Hammarlund, Härle & Karlsson 2016). Den inställningen har därmed använts till brunnarna i den här modellen. Metoden använder sig av en "Mean Energy Approach" vid beräkningarna vilket innebär att energiförlusterna i inloppet till brunnen försummas helt och att energilinjen i brunnen sätts till samma nivå som hos det tillflödande röret.



Om brunnen har flera rör som ansluter till brunnen beräknas energinivån som ett viktat medelvärde där anslutande rör med större flöden har en större påverkan på energinivån än dem med mindre flöden (DHI 2020). Täckningstypen för noder kan beskrivas på tre sätt, Normal, Sealed och Spilling. Med inställning "Normal" skapas ett tillfälligt magasin då vattennivån i brunnen stiger över marknivån. Vattnet samlas där i det tillfälliga magasinet tills vattennivån i brunnen sjunker och det magasinerade vattnet kan rinna ner. Vid inställningen "Sealed" rinner vattnet inte upp på ytan då vattennivån stiger (DHI 2017). Brunnarna i modellen har inställningen "Normal".

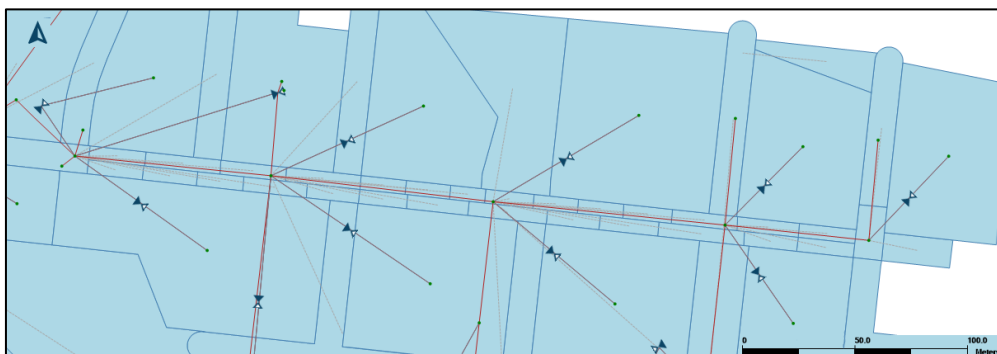
### 3.2.2 Avrinningsområden

Vid beräkningen av avrinning från gatan till brunnarna har tid-area-metoden använts, vilken ofta används för avrinningsberäkningar i Sverige (Blomquist et al. 2016). Metoden använder sig av ett samband som beskriver hur stor del av den avrunna volymen som bidragit vid en viss tidpunkt. En fördel med metoden är att den är relativt enkel att använda då den använder sig av få parametrar. Parametrarna är och beskrivs av DHI (2017) som:

- Area (ha). Avrinningsområdets area.
- Imperviousness (%). Anger hur stor del av avrinningsområdet som bidrar till avrinningen.
- Time of concentration (min). Hur lång tid det tar tills avrinningsområdets mest avlägsna punkt bidrar till avrinningen.
- Reduction factor. Faktor för att korrigera den bidragande hårdgjorda ytan.
- Initial loss (mm). Ett definierat värde för stor nederbörd som krävs innan avrinning sker.
- Time-area curve. Påverkar formen på flödeskurvan.

För att modellera skelettjordar längsmed gatan i den befintliga modellen har det antagits att träd anlagda i skelettjordar med hårdgjord yta finns på båda sidor av vägen med ett avstånd på 10 meter mellan träden. En brunn med infiltrationsrör enligt typritning för träd i hårdgjord yta med kolmakadam från Stockholms stad (se Bilaga 1) antas kunna förse två träd med dagvatten och avståndet mellan två brunnar sätts därför till 20 meter.

Med det i åtanke har de fem större avrinningsområden i den befintliga modellen delats upp i 27 mindre avrinningsområden med storlek mellan 100–240 m<sup>2</sup>. Medelvärdet och medianen för avrinningsområdenas storlek är 157 m<sup>2</sup> respektive 154 m<sup>2</sup>. Som referenspunkt för avrinningsområdenas storlek kan en jämförelse göras med dem i Hammarby sjöstad där varje brunn hade ett bidragande avrinningsområde på ca 110 m<sup>2</sup> (Alm 2005). Studieområdet med de 27 nya avrinningsområdena kan ses i Figur 6 nedan.



Figur 6 Studieområdet med de nya avrinningsområdena.

Då avrinningsområdena delades upp i fler, mindre avrinningsområden behövdes även koncentrationstiderna för de olika områdena justeras. Det gjordes genom att mäta avståndet från den mest avlägsna punkten i avrinningsområdet till noden på ledningsnätet som avrinningsområdet var kopplat till och sedan dividera det med flödes hastigheten för mark enligt Tabell 2. Rinnlängden uppmättes till ca 16 meter vilket resulterade i en koncentrationstid på 3 minuter.

Tabell 2 Flödes hastigheter för olika material (Svenskt Vatten 2016).

Material	Flödes hastighet (m/s)
Ledning i allmänhet	1,5
Tunnel och större ledning	1,0
Dike och rännsten	0,5
Mark	0,1

För att kontrollera att de nya avrinningsområdena i modellen ger samma resultat som för de ursprungliga körs modellen för de två scenariona.

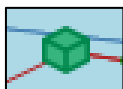
Flödena visar sig vara lika och den nya uppdelningen med avrinningsområdena bedöms inte ha påverkat modellens resultat. Parametervärdena för avrinningsområdena ses här i Tabell 3 nedan. Areal varierade hos de olika avrinningsområdena.

Tabell 3 Parametrar och dess värden för avrinningsområdena.

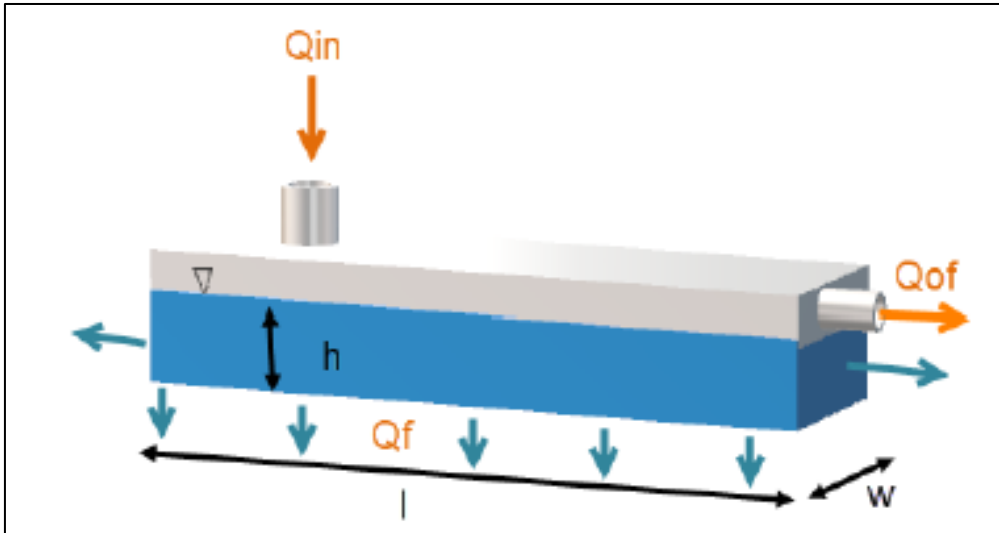
Parameter	Enhet	Värde
Imperviousness	%	80
Time of concentration	min	3
Reduction factor	-	1
Initial loss	mm	0,6
Time-Area curve	-	TACurve1

### 3.2.3 Soakaway

För att modellera skelettjordar i MU+ har den inbyggda soakaway-modulen valts som tillvägagångssätt. Soakaway-modulen är en nod-typ som kan användas för hydraulisk modellering av blå-gröna lösningar. Noden kan likt andra noder i MU+ kopplas till ett ledningsnät för att studera infiltrationslösningars hydrauliska effekt (DHI 2020). I bilden nedan ses hur en soakaway-nod gestaltas grafiskt i MU+.



Modulens uppbyggnad kan liknas vid ett magasin där dess geometri, interna porositet, vattennivå och exfiltration ut ur magasinet definieras. Det finns tre olika sätt att definiera infiltrationen till den omkringliggande marken: en konstant infiltrationshastighet, ingen infiltration samt en infiltration som är proportionerlig mot vattennivån i modulen. Proportionalitetskonstanten anges som den mättade hydrauliska konduktiviteten hos den omkringliggande jorden (DHI 2020). För denna studie har den sistnämnda metoden valts.



Figur 7 Schematisk bild av soakaway-modulen (DHI 2020).

I Figur 7 ses en överskådlig bild av soakaway-modulen och dess funktion. Beräkningarna för hur vattennivå och infiltrationen beräknas beskrivs i ekvationerna nedan.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{l \cdot w \cdot \theta} (Q_{in}(t) - Q_f(t) - Q_{of}(t)) \quad (1)$$

$$Q_f = K(l \cdot w + 2h(l + w)) \quad (2)$$

$K$  = Mättad hydraulisk konduktivitet

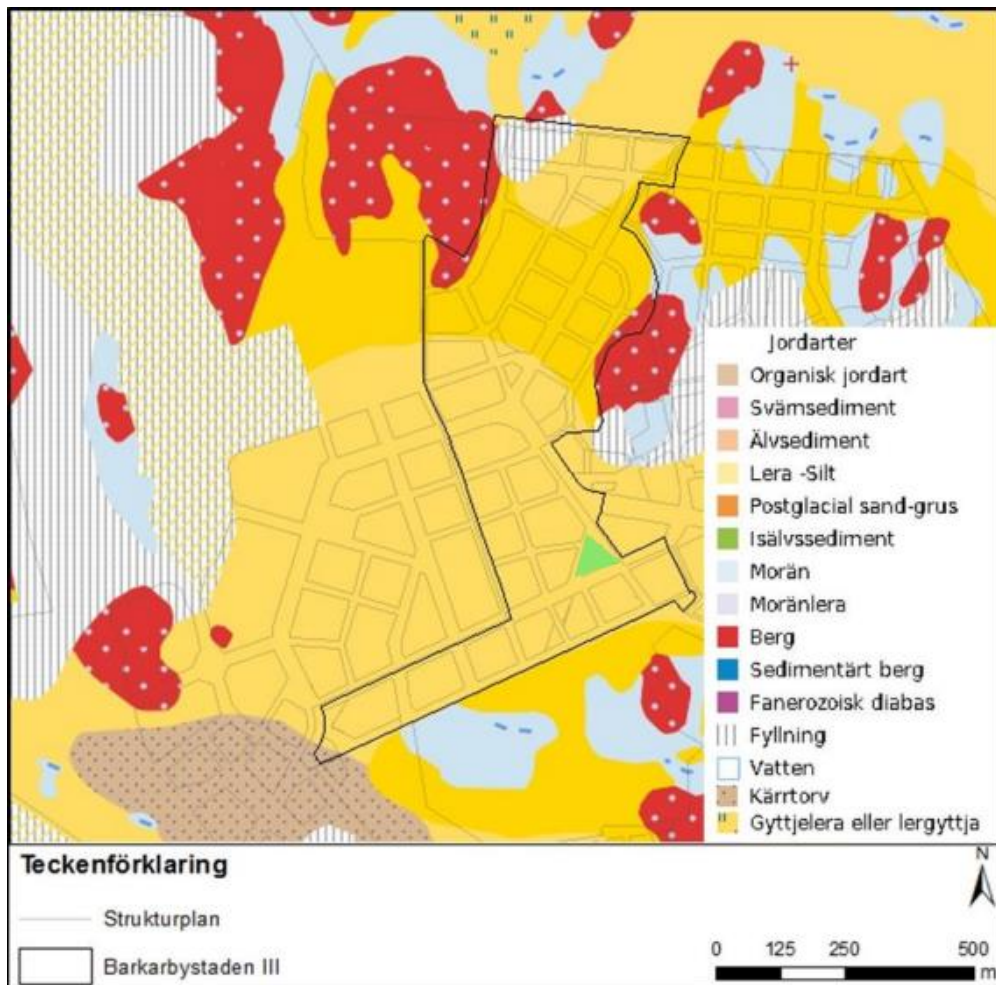
$\theta$  = Porositet

Det går även att ange separata värden för den hydrauliska konduktiviteten hos sidorna och botten i modulen. Då ser istället ekvationen för infiltrationen ut som följande (DHI 2020).

$$Q_f = K_{botten} \cdot A_{botten} + K_{sida} \cdot \left( A_{tvärsnitt} + \frac{Volym}{A_{tvärsnitt}} \right) \quad (3)$$

Ett vanligt antagande är att små, finare partiklar ofta tar sig ner till botten, ackumuleras och täpper igen den efter en tids verkan vilket förhindrar exfiltration genom botten (Larm och Blecken 2019). Detta antagande har gjorts vid denna studie och exfiltrationen ut genom botten har satts till noll.

Från en dagvattenutredning av en tidigare etapp av Barkarbystaden gjord av Tyréns (2017) med en jordartskarta från SGU, kan det i Figur 8 utläsas att marken består till stor del av lera med inslag av morän och berg.



Figur 8 Jordartskarta för Barkarbystaden (Tyréns 2017).

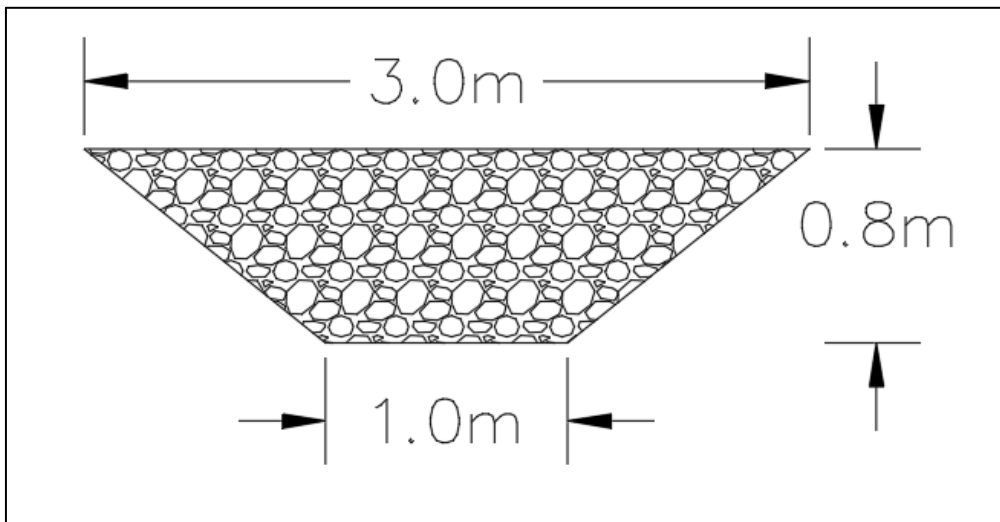
Den mättrade hydrauliska konduktiviteten har därmed satts till  $10^{-8}$  m/s enligt Tabell 4, vilket är mycket lågt och infiltrationen ut är väldigt begränsad. Då det är trafikdagvatten som kommer att ledas till skelettjordarna finns det även skäl att argumentera för att skelettjordarna bör anläggas med ett tätt geomembran som förhindrar dagvattnet och dess föroreningar att transporteras till omkringliggande mark och grundvatten.

Den hydrauliska konduktivitet hade då satts till 0, vilket kan så gott som jämföras med  $10^{-8}$  m/s.

Tabell 4 Mättad hydraulisk konduktivitet för olika jordarter (Espeby & Gustafsson 1998).

Material	K (m/s)
Fingrus	$10^{-1} - 10^{-3}$
Grovsand	$10^{-2} - 10^{-4}$
Mellansand	$10^{-3} - 10^{-5}$
Grovsilt	$10^{-5} - 10^{-7}$
Morän	$10^{-6} - 10^{-9}$
Lerig morän	$10^{-8} - 10^{-11}$
Lera	$<10^{-9}$

Enligt Stockholms stads handbok för växtbäddar ska skelettjordens volym vara minst  $15 \text{ m}^3$  per träd (Alvem & Embrén 2017). Med två träd per skelettjordssegment på 20 meter behövs således en volym på minst  $30 \text{ m}^3$ . Med detta i hänsyn valdes en geometri med en tvärsnittsarea som kan ses i Figur 9 och ger en volym på  $32 \text{ m}^3$ . Ett förhållande mellan höjden och tvärsnittsarean samt arean i plan gjordes för att beskriva geometrin i modellen.



Figur 9 Geometri för skelettjordskonstruktionen.

Porositeten i det öppna förstärkningslagret i ett BGG-system kan vara mellan 30–40 procent och porositeten i modulerna sattes därmed till 30 procent (Edge 2020). Skelettjordarna antogs vara tomma vid början på regn och vattennivå sattes till bottennivån. En sammanfattande tabell över parameterinställningarna kan ses i Tabell 5.

Tabell 5 Parametrar och dess inställningar för soakaway-modulen.

Parameter	Enhet	Värde
Infiltrationsmetod	-	Infiltration
K, sida	m/d	0,000864
K, botten	m/d	0
Porositet	%	30
Täckningstyp(Cover type)	-	Sealed

### 3.2.4 Brunnar, infiltrationsrör och dräneringsrör

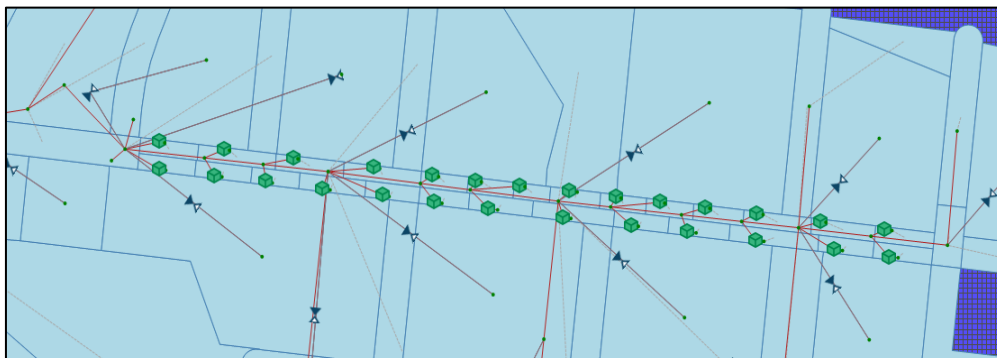
Skelettjordarna antas vara anlagda med en hårdjord yta och vatten leds till dem via brunnar och fördelningsledningar. Med typritning för träd i hårdjord yta med kolmakadam från Stockholms stad (se Bilaga 1) som underlag har brunnens dimension satts till att vara 1 meter djup och ha en diameter på 400 mm. Parametern för brunnens täckningstyp har satts till basvärde Normal, vilket innebär att vatten flödar upp på ytan då vattennivå i brunnen överstiger dess djup. Energiförluster beräknas med metoden ”Weighted Inlet Energy”. Brunnsinloppet antas klara av att ta in flöden upp till 15 l/s.

Vid halva brunnens djup, 500 mm, går ett fördelningsrör på 110 mm ut till skelettjorden. Enligt typritningen är ett rör 4 meter långt, men då MU+ sätter rör kortare än 10 meter till 10 meter vid beräkningarna har ingen vikt lagts vid att rörlängden ska vara exakt 4 meter. Inget fördelningsrör i modellen är dock längre än 10 meter. För friktionsförlusterna har rören satts till att vara av plast med det fördefinierade M-värdet på  $80 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

Då uppgifter saknas görs ett antagande att den tillgängliga arean för infiltration i infiltrationsröret kan jämföras med tvärsnittsarean i röret.

Enligt Döse & Schouenborg (2017) uppvisar krossmaterial med kornfraktion 2/32 mm en hydraulisk konduktivitet på ca 0,011 m/s och Larsson (2008) anger att fraktionen fingrus 2/6,3 mm kan ha en permeabilitet på 1-0,01 m/s. Kolmakadam har enligt ritning en fraktion på 32/90 mm och med ovan nämnda uppgifter antas det ha en hydraulisk konduktivitet på 0,5 m/s. Ett antaget maximalt infiltrationsflöde till soakaway-modulen fås därmed från att multiplicera den tillgängliga arean i röret med 0,5 m/s och resulterar i ett värde som avrundats till närmsta heltal, 5 l/s. Det tillämpas i modellen som en flödesreglering i infiltrationsröret.

Då marken består av lera som förhindrar infiltration ut ur skelettjorden kopplas ett dräneringsrör från skelettjorden till ledningsnätet för att tömma det på vatten. Dräneringsröret har satts till att vara på en höjd på 20 cm över botten och har en flödesreglering som varierats mellan 0,5–5 l/s vid olika simuleringar. Detta för att undersöka hur olika flödesregleringar påverkar fyllnadsgraden i magasinet och belastningen på ledningsnätet. För att koppla dräneringsrören till ledningsnätet har noder lagts till med jämna mellanrum på ledningen i gatan. Noderna dimensioneras likt de befintliga noderna i gatan med en diameter på en meter, täckningstyp ”Normal” och energiförluster enligt ”Weighted Inlet Energy”. I Figur 10 ses den färdiga modelluppbyggnaden med soakaway-moduler.



Figur 10 Den färdiga modelluppbyggnaden för studieområdet.



En sammanfattande tabell med parameter-värden för brunnar, infiltrationsrör och dräneringsrör ses i Tabell 6.

Tabell 6 Parametrar och dess värden för brunnar, infiltrationsrör och dräneringsrör.

Parameter	Enhet	Värde
<b>Brunn</b>		
Djup	m	1
Diameter	mm	400
Täckningstyp	-	Normal
<b>Fördelningsrör</b>		
Diameter	mm	110
Manning, M	$m^{1/3}/s$	80
Flödesreglering	l/s	5
<b>Dräneringsrör</b>		
Diameter	mm	110
Manning, M	$m^{1/3}/s$	80
Flödesreglering	l/s	0,5–5

### 3.2.5 Förenklingar och antaganden

För den hydrauliska modellen är det enbart själva skelettkonstruktionen och dess magasineringkapacitet i den porösa strukturen som använts. Trädets hydrologiska funktion med exempelvis interception i trädkronan eller rötternas uppsugningsförmåga har inte tagits i beaktning.

En alternativ modelluppbyggnad där soakaway-moduler kopplades samman via ett överfall för att simulera horisontellt flöde i skelettjordarna testades också. Där beräknades ett parametervärde för överfallskonstanten med Darcy's ekvation för att likna flödet genom det porösa materialet. Men efter jämförelse av de två modelluppbyggnaderna valdes slutligen uppbyggnaden som redovisats ovan med motiveringen att den kräver färre osäkra antaganden då mätdata saknas. En annan faktor som vägde in är att ett flödesstråk oftast är mellan 20–30 meter för att maximera magasineringsvolymer (Edge 2020).

### 3.3 Handberäkning

Enklare hanberäkningar för förloppet från avrinning till flöde i dräneringsröret har gjorts för att erhålla en referens vid kontroll av modellens uppbyggnad. För beräkning av avrinningen användes rationella metoden. I avsnitt 3.2.2 redovisades att den beräknade koncentrationstiden var 3 minuter, men då rinntiden enligt P110 (Svenskt Vatten 2016) inte bör understiga 10 minuter ansattes den dimensionerande varaktigheten ( $t$ ) till just 10 minuter. Med en återkomsttid på 20 år ( $T$  angivet i månader) beräknades regntintensiteten ( $i$  angivet i l/s/ha) med Dahlströms formel (Dahlström 2010).

$$T = 240 \text{ månader}$$

$$t = 10 \text{ minuter}$$

$$i(t) = 190 \cdot \sqrt[3]{T} \cdot \frac{\ln(t)}{t^{0,98}} + 2 \quad (4)$$

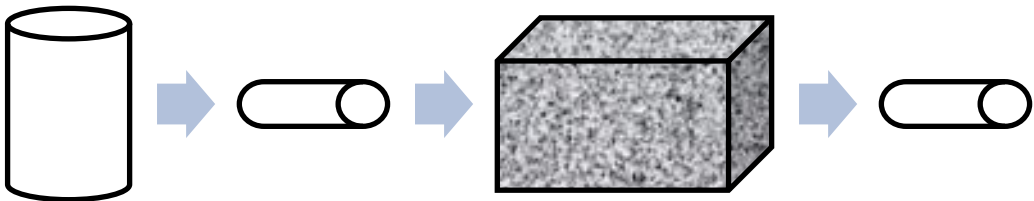
Den beräknade regntintensiteten användes sedan tillsammans med en avrinningskoefficient ( $\phi$ ) för gata satt till 0,8, en klimatfaktor på 1,25 samt arean för avrinningsområdet med storleken 156 m<sup>2</sup> för att beräkna det dimensionerande flödet.

$$\Phi = 0,8$$

$$kf = 1,25$$

$$q_{dim} = A \cdot i \cdot \phi \cdot kf \quad (5)$$

En numerisk beräkning med en kombination av kontinuitetsekvationen samt energiekvationen användes för att beräkna flöden och vattennivå i flödeskedjan som illustreras i Figur 11 nedan.



Figur 11 Schematisk bild av flödeskedjan för handberäkningarna.

Brunnen och rören har samma dimensioner som är beskrivet ovan i modellupbyggnaden. Skelettjorden sätts till en rektangel med bredd 2 meter, längd 20 meter och djup 0,8 meter, vilket ger en total volym på 32 m<sup>3</sup>. Den beräknade avrinningen antas flöda in i brunnen utan att några energiförluster sker vid inloppet. Med kontinuitetsekvationen kan därmed vattennivån i brunnen beräknas enligt:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in} - Q_{infiltrationsrör}}{A_B} \quad (6)$$

Flödet i infiltrationsröret beräknas med energiekvationen där energiförluster vid inloppet och i röret tas med i beräkningen.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + K_E \frac{v_2^2}{2g} + f \frac{L}{D} \frac{v_2^2}{2g} \quad (7)$$

Den kan skrivas om till:

$$h = \left(1 + K_E + f \frac{L}{D}\right) \frac{v_2^2}{2g} \quad (8)$$

Där h är vattennivån över infiltrationsrörets inlopp. Ett uttryck för flödet i dräneringsröret kan sedan erhållas genom att skriva om ekvationen till att visa flödeshastigheten och multiplicera med rörets area.

$$Q = V \cdot A_{rör} = \sqrt{\frac{2gh}{1 + K_E + f \frac{L}{D}}} \cdot A_{rör} \quad (9)$$

Vattennivån i skelettjorden beräknas sedan med ekvation (1) och (3) likt beräkningen i MU+. Flödet i dräneringsröret beräknas som för infiltrationsröret enligt ekvation (9).

För den numeriska beräkningen användes ekvationerna ovan för att beräkna värden med tidssteg på en sekund.

Om vattennivån i brunnen,  $h < 0,5\text{m}$  användes följande ekvation:

$$h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{A_B} Q_{in,k} \quad (10)$$

När vattennivå överstiger 0,5 m aktiveras infiltrationsröret och vattennivå i brunnen beräknas enligt nedan. Flödet reglerades till ett maxvärde på 5 l/s.

$$h_{k+1} = h_k + \frac{\Delta t}{A_B} \left( Q_{in,k} - A_{rör} \sqrt{\frac{2g(h_k - 0,5)}{1 + K_E + f \frac{L}{D}}} \right) \quad (11)$$

Det beräknade flödet i infiltrationsröret agerar därefter som inflöde till skelettjorden som beräknar vattennivå likt ekvation (11). Flödet i dräneringsröret regleras till maximalt 1 l/s.

$$h_{skj+1} = h_{skj} + \frac{\Delta t}{A_{skj} \cdot \theta} \left( Q_{inf,k} - \left( \left( A_{rör} \sqrt{\frac{2g(h_{skj} - 0,2)}{1 + K_E + f \frac{L}{D}}} + K_s \left( A_{tvärsnitt} + \frac{Volym}{A_{tvärsnitt}} \right) \right) \right) \right) \quad (12)$$

De ansatta värdena för parametrarna ses i Tabell 7 nedan.

Tabell 7 Värden för parametrar i handberäkningen.

Parameter	Enhet	Värde
$K_E$	-	0,5
F	-	0,018

### **3.4 Känslighetsanalys**

För att kontrollera hur val av hydraulisk konduktivitet för soakaway-modulen påverkar vattennivån i och flödet ut ur modulen har en känslighetsanalys gjorts med tre K-värden:  $10^{-5}$  m/s,  $10^{-6}$  m/s och  $10^{-8}$  m/s. I MU+ anges den hydrauliska konduktiviteten i m/d och K-värdena räknades därför om till 0,864 m/d, 0,0864 m/d samt 0,000864 m/d.

Simuleringar har körts för de olika K-värden med ett CDS-regn med en återkomsttid på 30 år och en varaktighet på 3 timmar. Flödet i dräneringsröret har reglerats till max 1 l/s för känslighetsanalysen.

### **3.5 Simulering av ledningsnät**

För att undersöka skelettjordskonstruktionernas funktion vid olika storlek på den belastande nederbörden kördes simuleringar med fyra olika CDS-regn. Ett CDS-regn är ett konstgjort regn som är uppbyggt av flera sammansatta blockregn och används ofta vid dimensionering av dagvattennät (MSB 2017). De fyra olika regnen var ett 2-årsregn med fyra timmars varaktighet, ett 5-årsregn med fyra timmars varaktighet, ett 10-årsregn med fyra timmars varaktighet och ett 30-årsregn med tre timmars varaktighet. Flödet i dräneringsröret reglerades till 0,5, 1, 2, 3 och 5 l/s vid olika simuleringar för de fyra regnen.

Resultaten från simuleringarna ses i avsnitt 4.4 Hydraulisk modellering.

## 4 Resultat och analys

### 4.1 Intervjuer

Svaren från intervjuerna sammanställdes och redovisas här under de övergripande underrubrikerna.

#### 4.1.1 Användning av skelettjordskonstruktioner

##### *Befintliga skelettjordar*

4 av 5 intervjuade svarade att det finns skelettjordar anlagda i deras kommun även om vissa bara hade några få. Det fanns dock planer på att anlägga fler hos dem som har befintliga skelettjordar samt hos den kommun där det inte fanns några i dagsläget.

##### *Utformning*

Gällande utformningen av skelettjordskonstruktionerna använde 4 av 5 en uppbyggnad likt stockholmsmetoden i Stockholms stads handbok. Person Nr. 2 från Nacka kommun hänvisade till en egen lösning som tagits fram och beskrivs i kommunens egen tekniska handbok (se Bilaga 2). Dess utformning kan där beskrivas som en större förstärkt låda där dagvatten leds in till skelettjorden. Dagvatten leds in från bland annat gata och konstruktionen ska där kunna ta hand om 10 mm regn från körytan.

Användningen av nedspolat material som biokol i skelettjordarna skiljde sig mellan de intervjuade där två kommuner inte använt det (varav en där skelettjordar inte anlagts), en inte visste och två har använt det. Person Nr. 3 från Malmö stad berättade att olika varianter hade testats vid anläggandet av skelettjordar för att undersöka dess effekt. Där har tillsatsmaterial som provats i trädgropen varit pimpsten och grönkompost. Även att sopa ned pimpsten i skelettdelen har testats, då med kvoten 50 l/m<sup>3</sup>. I ett nytt projekt där ska även en biokolsinblandning tillsammans med pimpsten och grönkompost testas.

##### *Primär funktion vid anläggning*

4 av 5 sa att skelettjordens primära fokus vid anläggandet hade varit att skapa gynnsamma förhållanden för träd. Trafikkontoret i kommunen ser enbart skelettjordarna som en åtgärd för att förse träden med tillräckligt med volym och vatten enligt Person Nr. 1 från Stockholms stad.

De på exploateringskontoret ser dock också till att utnyttja dem för dagvattenhantering där det ses som en åtgärd för både rening och volym. Vid dimensionering prioriteras deras effekt för rening. Detta med hänsyn till åtgärdsnivåer. Person Nr. 2 berättade att de ser skelettjordarna som en vattenåtgärd där det är rening som prioriteras vid planering och projektering. Eventuell fördröjning är en sekundär funktion. Nacka vatten och avfall har krav på att av den avrinning som sker ska 10 mm av varje regn renas i en LOD-anläggning före anslutning till ledningsnät.

Träden har ofta varit prioriterat vid anläggandet av skelettjordar men Person Nr. 3 vill egentligen inte säga att det handlar om en prioritering av det ena eller det andra, utan snarare om en helhetsbild. Det handlar om att skapa en bra stadsmiljö och då se till en komplett bild. Träd har en viktig påverkan för stadsmiljön, stadsbilden och människors hälsa i staden men att kunna ta hand om dagvatten och skyfall är också av stor vikt. Vilken funktion som eftersträvas vid anläggandet beror också på platsen och kan därför skilja sig mellan olika fall. Enligt Person Nr. 3 ser de på gatukontoret i Malmö stad vatten till skelettjordsanläggningar som en resurs till träden med bevattning och inte som en belastning. Det ses inte som ett bekymmer att skelettjordarna fylls med vatten och det har inte märkts av att träd eller dylikt skulle ha tagit skada av för mycket vatten i skelettjordar. Det finns även dräneringsrör i skelettjordar för att undvika att vatten blir stående i skelettjordarna. Att skapa en bra stadsmiljö består av många olika delar och att skelettjordskonstruktioner kan fylla flera funktioner ses som en stor fördel vid stadsplanering och urbanisering.

#### *Fördröjning vid dimensionering*

Alla de fem tillfrågade svarade nej på att en preliminär fördröjning från skelettjordar har tagits i beaktning vid dimensionering av dagvattenledningsnät och/eller nedströms liggande fördröjningsåtgärder. Person Nr. 1 sa att de i Stockholms stad istället ser det som en extra kapacitet och säkerhetsmarginal. En anledning till att de inte tar det i beaktning i Nacka kommun är enligt Person Nr. 2 att de inte känner att de har kontroll över hur de sköts och att det är oklart hur deras hydrauliska funktion är.

### *Igensättning*

Ingen av de fem intervjuade hade hittills märkt eller hört talas om att det skulle ha uppstått problem med igensättning av skelettjordar. Detta bedömdes till dels kunna bero på att det ännu är för tidigt att säga och att anläggningarnas funktion kan utvärderas bättre efter en längre tid. Men det betonas att det är av vikt att spolning och tömning av sandfång fungerar bra för en upprätthållen funktion.

#### **4.1.2 Ansvarsfördelning**

Vem som ansvarar för skelettjordarna beror på vilket stadie det gäller. I Stockholms stad har enligt Person Nr. 1 exploateringskontoret ansvar för dimensionering och projektering. Men när skelettjordarna är anlagda är det trafikkontoret som sköter driften då skelettjordarna oftast är anlagda i samband med väg. Hos Person Nr. 3 i Malmö är det gata som ansvarar för planering och anläggning av skelettjordar. Då detta är en relativt ny anläggning har ingen tydlig ansvarsfördelning gjorts än mellan olika avdelningar men det antas vara trafik och gatukontoret som bär med sig ansvaret efter anläggning. I Nacka kommun hos Person Nr. 2 finns det en drift- och underhållsavdelning som sköter driften. Där troddes skelettjordarna hamna under park/väg-, park/gata-drift. I Alingsås och Haninge där Person Nr. 4 och Person Nr. 5 är verksamma var det trafikavdelningen som har ansvaret för skelettjordarna.

### *Ansvar för VA-enheten*

Ingen av de intervjuade svarade att VA-enheten har något ansvar att säkerställa skelettjordarnas fördröjningsfunktion. Både Person Nr. 1 och Person Nr. 2 hävdade att det kan vara en anledning till att de inte räknar med dess fördröjning vid dimensionering. Att de inte har kontroll över hur de sköts och det finns osäkerheter för anläggningarnas hydrauliska funktion över tid. Då det kan vara många nya frågor som dyker upp med hanterandet av skelettjordar kan det bli aktuellt för VA-enheten att involveras senare enligt Person Nr. 3. Men i dagsläget har VA-enheten inget ansvar för driften.

### *Problematik med ansvarsfördelningen*

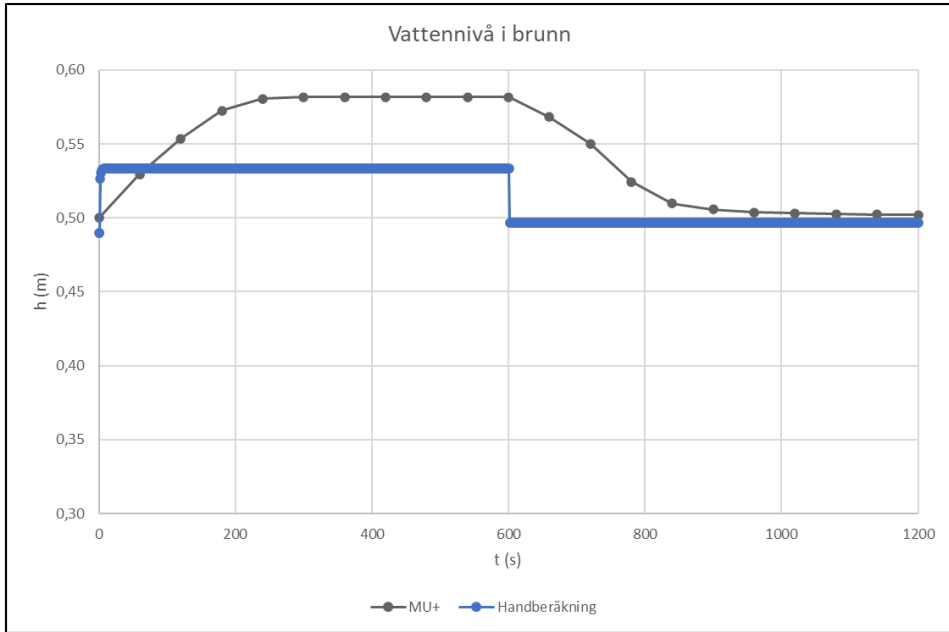
Om det finns brister och problematik med den ansvarsfördelning som kommunerna har idag kunde ingen svara på då det är en ny fråga som inte utretts och där problem ännu inte uppstått.



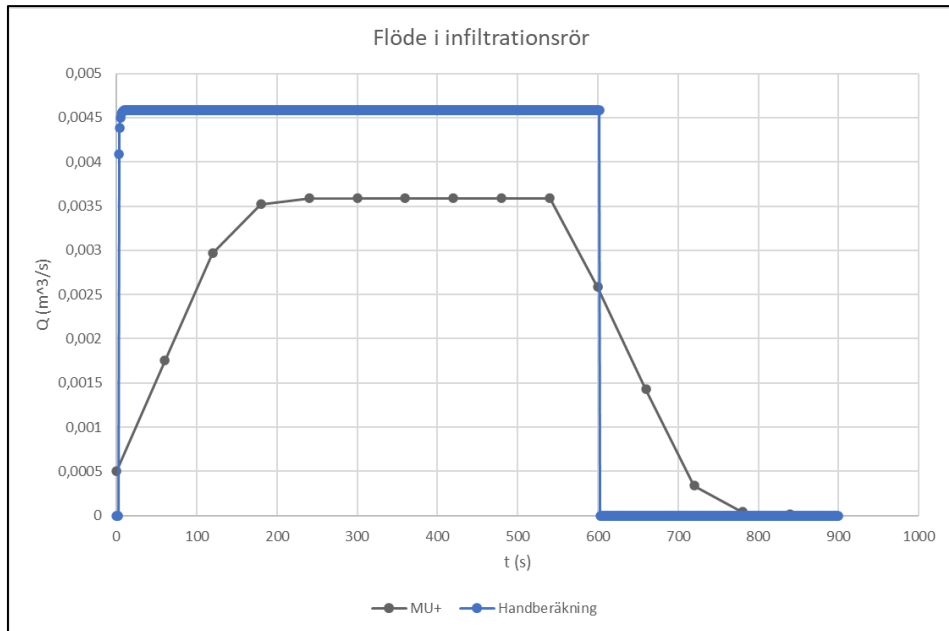


## 4.2 Handberäkning

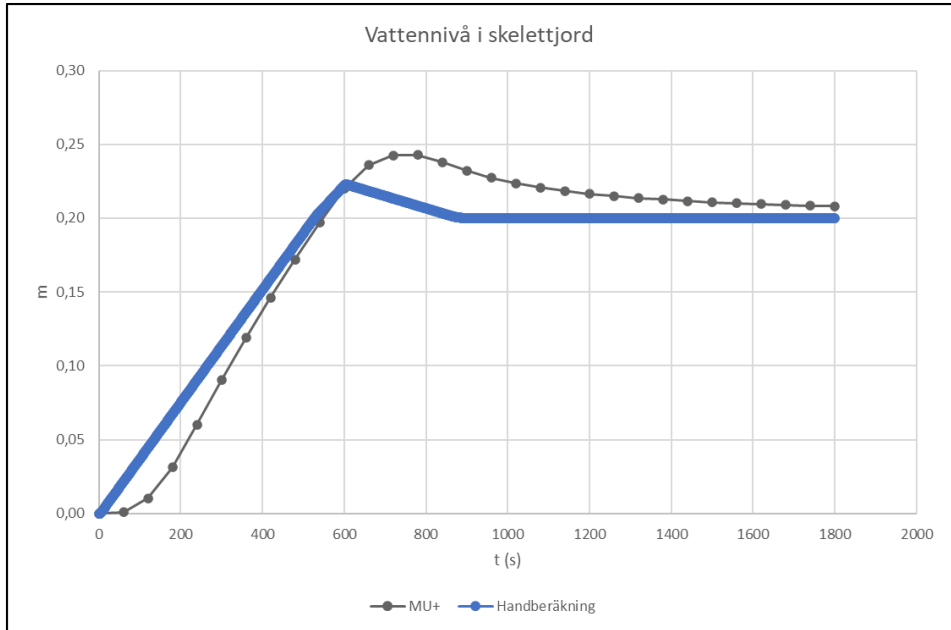
De gjorda handberäkningarna och resultatet från simuleringen i MU+ uppvisar en likhet i sina resultat som bedöms vara tillräckligt god för att motivera modelluppbyggnaden i MU+. Det anses dock finnas fel med handberäkningen där vattennivån i brunnen stiger till en nivå som understiger halv rörets höjd. Eftersom energiekvationen avser ett fullt trycksatt rör blir det då en orealistisk situation. Men detta bortses från i denna situation och resultaten från handberäkningarna tas ändå som stöd. Handberäkningen ersätter inte avsaknad av data men ger en referens till hur det uppbyggda systemet är tänkt att fungera. I Figur 12–15 här nedan kan det ses att de enklare handberäkningarna genererar resultat som är något kantigare med raka linjer jämfört med simuleringen i MU+. Det kan förklaras med att handberäkningarna gjordes med en väldigt förenklad avrinning som beräknades med rationella metoden. Ett flöde där hela avrinningsområdets reducerade area bidrar till avrinningen beräknades för ett regn med en varaktighet på 10 minuter. Detta flöde erhöles direkt utan en stegvis ökning och sattes därefter till att fortgå i 10 minuter för att sedan sluta tvärt. Det är förstås inte en korrekt representation av det verkliga avrinningsförloppet men bedömdes vara acceptabelt för det här fallet. Som jämförelse används tid-area-metoden vid beräkningarna i MU+ där storleken på arean som bidrar till avrinningen varierar med tiden. Det ger upphov till en mjukare graf där ett maxflöde inte erhålls direkt liksom handberäkningarna, utan efter en tid in i simuleringen. För handberäkningarna användes tidssteg på en sekund och då tidsstegen är många och täta illustreras de ofta som heldragna linjer i graferna. Simuleringen i MU+ använder tidssteg på en minut och resultatet för varje tidssteg blir därmed tydligare att se i graferna.



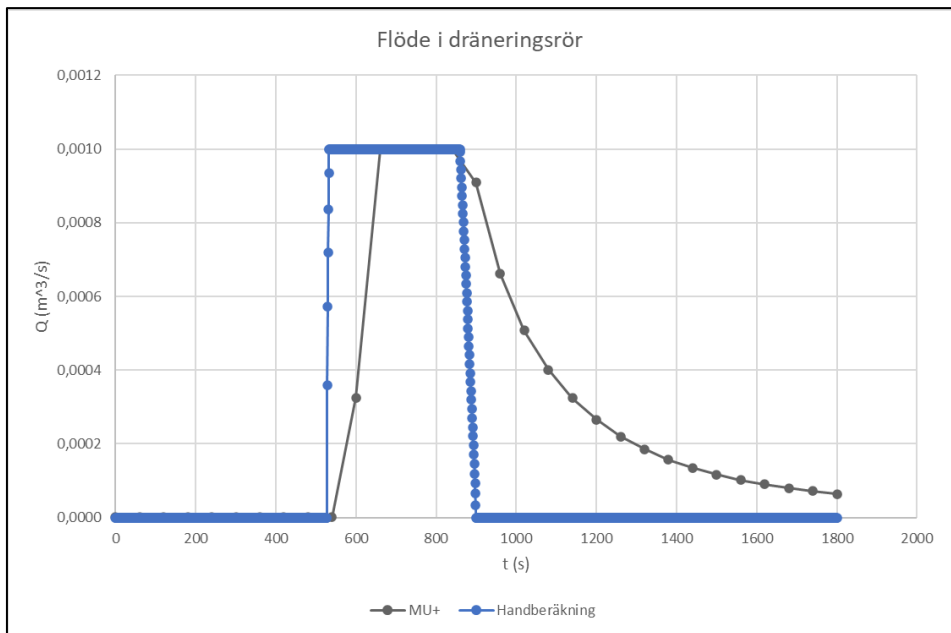
Figur 12 Jämförelse av resultat för vattennivån i brunn från simulering och handberäkning.



Figur 13 Jämförelse av resultat för flöde i infiltrationsrör från simulering och handberäkning.



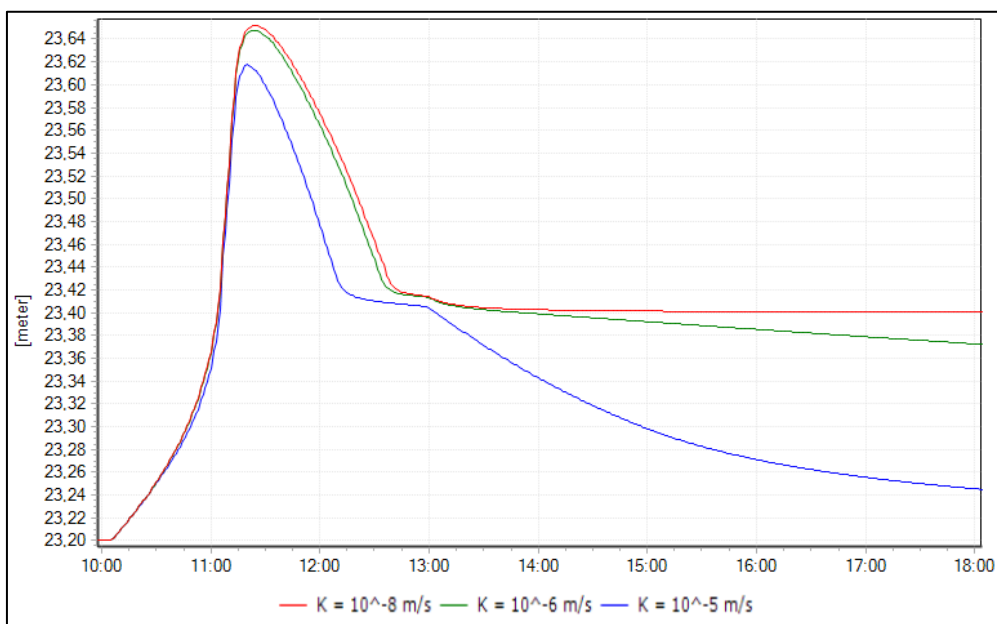
Figur 14 Jämförelse av resultat för vattennivån i skelettjord från simulering och handberäkning.



Figur 15 Jämförelse av resultat för flöde i dräneringsrör från simulering och handberäkning.

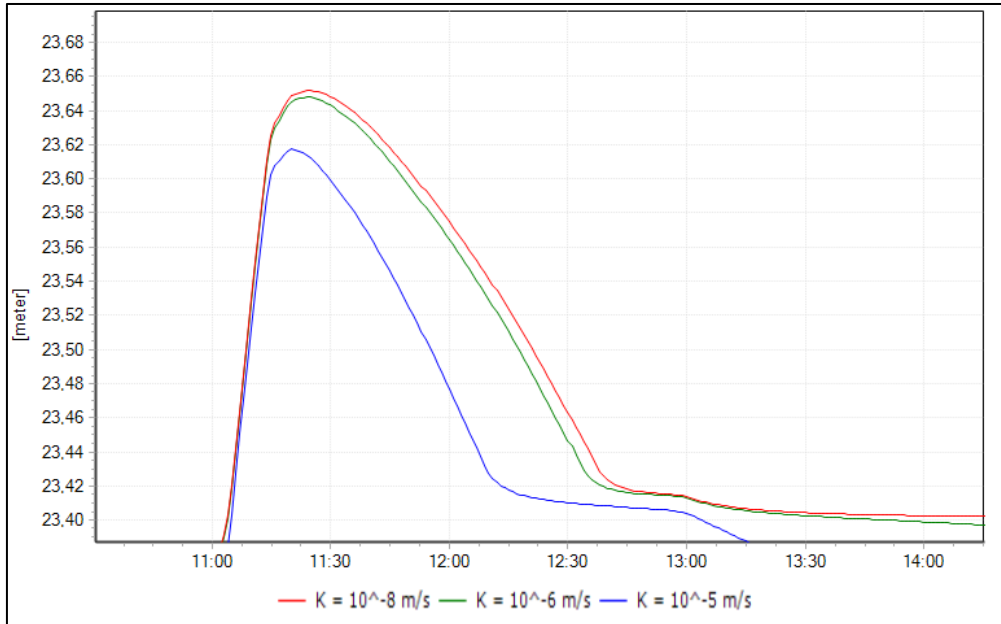
### 4.3 Känslighetsanalys

Trots att skelettjordsmodulerna är uppbyggda likadant är dess belastning och funktion platsspecifik. Med avrinningsområden som varierar mellan 100–240 m<sup>2</sup> skiljer sig även resultaten hos de olika enskilda modulerna. Istället för att visa den resulterande vattennivån och flödet från var och en av de 27 modulerna redovisas vattennivån och flödet i dräneringsröret för skelettjorden som är kopplad till ett avrinningsområde på 156 m<sup>2</sup>. Detta med motiveringen att medelvärdet för avrinningsområdena är 157 m<sup>2</sup> och medianen 154 m<sup>2</sup>.



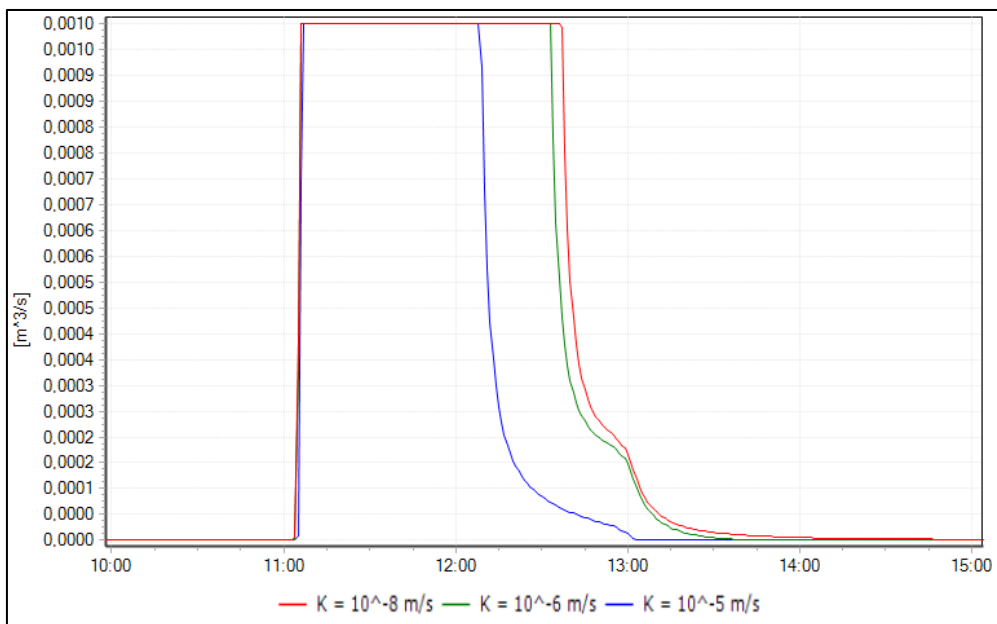
Figur 16 Vattennivån i soakaway-modulen vid känslighetsanalysen.

I Figur 16 ovan ses att de tre simuleringarna ger en snarlik vattennivå i soakaway-modulen där den sjunker något då den hydrauliska konduktiviteten sätts till 10<sup>-5</sup> m/s. Det är först när vattennivån i skelettjorden sjunkit till 20 cm över botten där dräneringsröret ligger som en tydlig skillnad kan ses. I Figur 17 nedan ses en förstoring av toppvärdena för vattennivån i skelettjorden.



Figur 17 Toppvärden för vattennivån i soakaway-modulen.

Med flödet i dräneringsröret strypt till 1 l/s resulterar ett K-värde på  $10^{-5}$  m/s i att den dränerade volymen minskar och att flödet i dräneringsröret upphör drygt 30 minuter tidigare än för de två andra K-värdena. Detta redovisas i Figur 18 nedan.



Figur 18 Flöden i dräneringsröret vid känslighetsanalysen.

Tabell 8 visar hur den totala volymen som flödet från dräneringsrören belastar ledningsnätet med påverkas av den hydraulisk konduktiviteten. Volymen är den totala summan för de 27 dräneringsrören vars hydrograf har integrerats för att erhålla dess volym.

Tabell 8 Ackumulerad flödesvolym i dräneringsrören för olika hydrauliska konduktiviteter.

Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Motsvarande jordart	Volym (m <sup>3</sup> )
$10^{-5}$	Mellansand, grovsilt	117
$10^{-6}$	Grovsilt, morän	162
$10^{-8}$	Lerig morän	168

Ett ökat K-värde från  $10^{-8}$  m/s till  $10^{-5}$  m/s ger en volymminskning på 30 procent medans en ökning från  $10^{-8}$  m/s till  $10^{-6}$  m/s resulterar i en reducering på 4 procent.

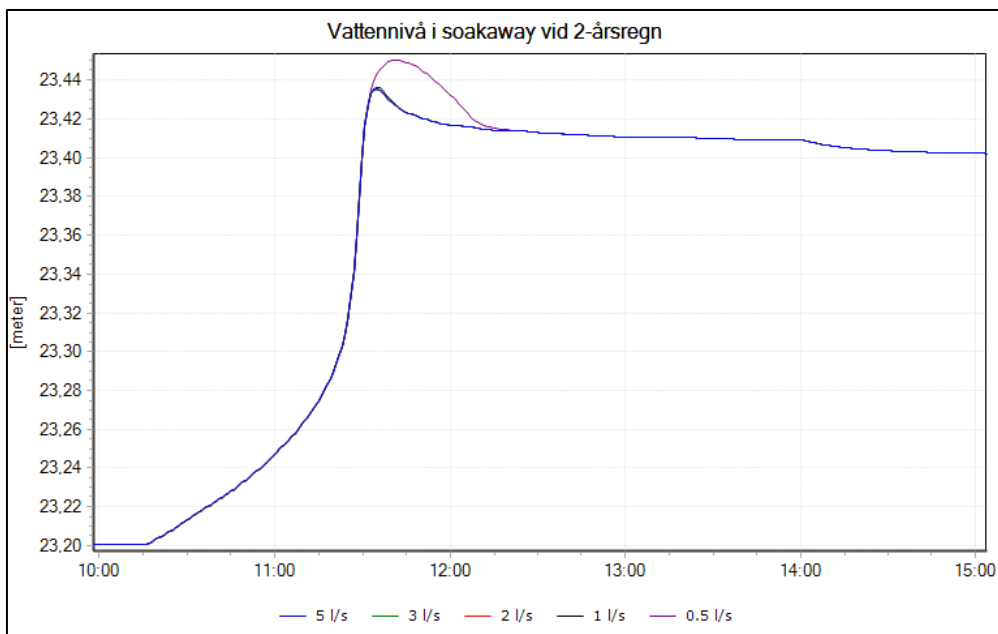
## 4.4 Hydraulisk modellering

Resultaten från de tre CDS-regnen presenteras här ned under respektive rubrik. För illustration av vattennivån i skelettjorden och flödet i dräneringsröret har modulen som är kopplad till ett avrinningsområde på 156 m<sup>2</sup> valts som representativ graf. Detta med motiveringen att medelvärdet för avrinningsområdena är 157 m<sup>2</sup> och medianen 154 m<sup>2</sup>. Beteendet hos övriga moduler har kontrollerats och kommenteras vid anmärkningsvärt beteende under respektive kapitel. Generellt uppvisar de olika modulerna ett liknande beteende men där de som belastas av en mindre avrinningsvolym genererar lägre värden för vattennivå och flöden och de med ett större avrinningsområde ger högre värden.

### 4.4.1 2-årsregn

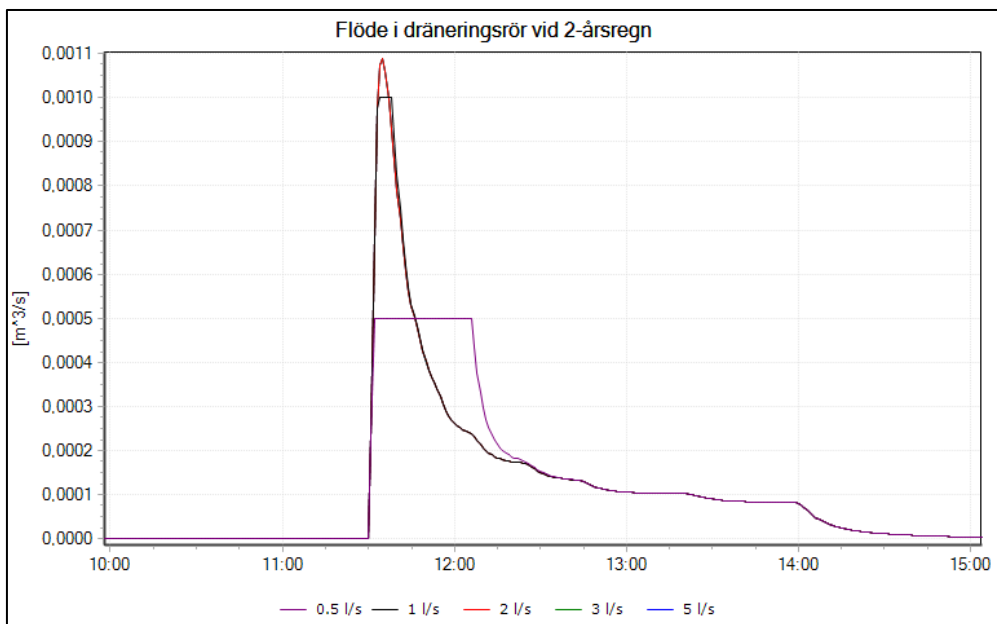
Vid simulering av ett 2-årsregn med fyra timmars varaktighet steg inte vattennivån i någon av de 27 brunnarna till den grad att de svämmade över. Vattennivån i soakaway-modulen uppvisade ett liknande beteende oavsett reglerat flöde i dräneringsröret. Figur 19 visar hur vattennivån stiger till 23 cm över botten vid en strypning av flödet mellan 1–5 l/s och upp till 25 cm över botten vid reglering till 0,5 l/s. Med en vattennivå som stiger till 25 cm av modulens total djup på 0,8 meter uppnås en fyllnadsgrad på 21 procent.





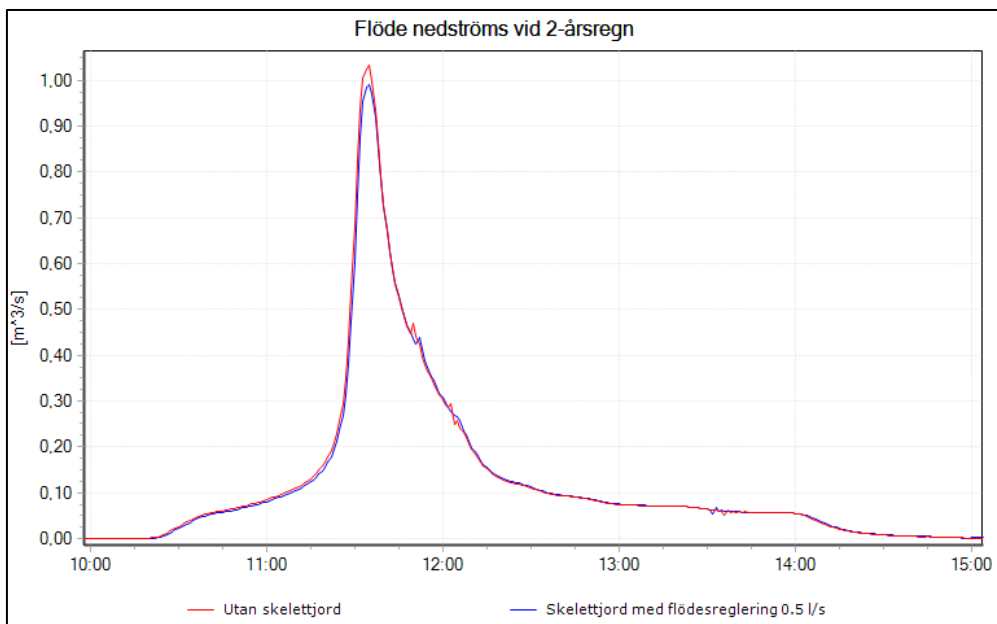
Figur 19 Vattennivå i skelettjorden vid ett 2-årsregn med fyra timmars varaktighet.

Vid reglerat flöde mellan 2–5 l/s uppnås ett flöde i dräneringsröret på knappt 1,1 l/s. Vid reglering av flödet mellan 0,5–1 l/s kan det i Figur 20 ses att flödet stannar på en plåtå vid respektive flödesreglering. Dräneringsröret var aktivt i ca 3 timmar oavsett strypning av flöde och flödet i röret upphörde ca 4,5 timmar efter regnets början.



Figur 20 Flöde i dräneringsröret vid ett 2-årsregn med fyra timmars varaktighet.

Flödet i ledningen nedströms då alla de 27 modulerna är påkopplade till ledningsnätet samt utan skelettjordsmoduler ses i Figur 21. Den redovisade hydrografen med skelettjordar är med en flödesreglering på 0,5 l/s och resulterar i en flödestopp på 990 l/s. Inkluderandet av modulerna ger upphov till en reducering av flödestoppen men ingen antydning till en fördröjning då de två hydrograferna följer varandra nära.



Figur 21 Flöde i röret nedströms vid simulering av ett 2-årsregn med och utan skelettjord.

Installationen av de 27 skelettjordsmodulerna resulterar i en minskning av toppflödet i röret nedströms med 42 l/s, vilket motsvarar en minskning med 4 procent jämfört med utan skelettjordar. Likt Figur 21 visar Tabell 9 att ingen fördröjning uppnås. De resulterande värdena är för tidssteg på en minut.

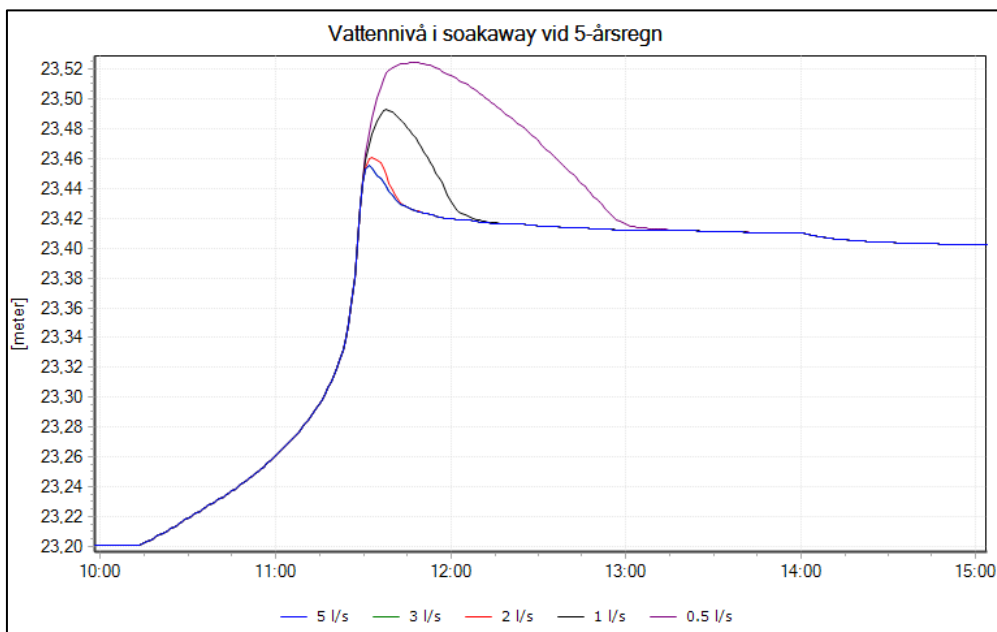
Tabell 9 Resultat från simulering av ett 2-årsregn där flödet reglerats till 0,5 l/s.

	Toppflöde (l/s)	Tidpunkt för flödestopp	Ackumulerat flöde (m <sup>3</sup> )	Ackumulerat flöde från dräneringsrör (m <sup>3</sup> )
Utan SKJ	1032	11:35	2318	-
Med SKJ	990	11:35	2278	57
Δ	42	0	41	-
Δ (%)	4,0	-	1,8	-

Genom integration av flödet i röret nedströms kan det ses att inkluderandet av skelettjordar genererar en minskning av flödesvolymen på 41 m<sup>3</sup>. Av de 2287 m<sup>3</sup> som flödar genom röret nedströms är det 57 m<sup>3</sup> (2,5 procent) som kommer ifrån skelettjordarna och dess dräneringsrör.

#### 4.4.2 5-årsregn

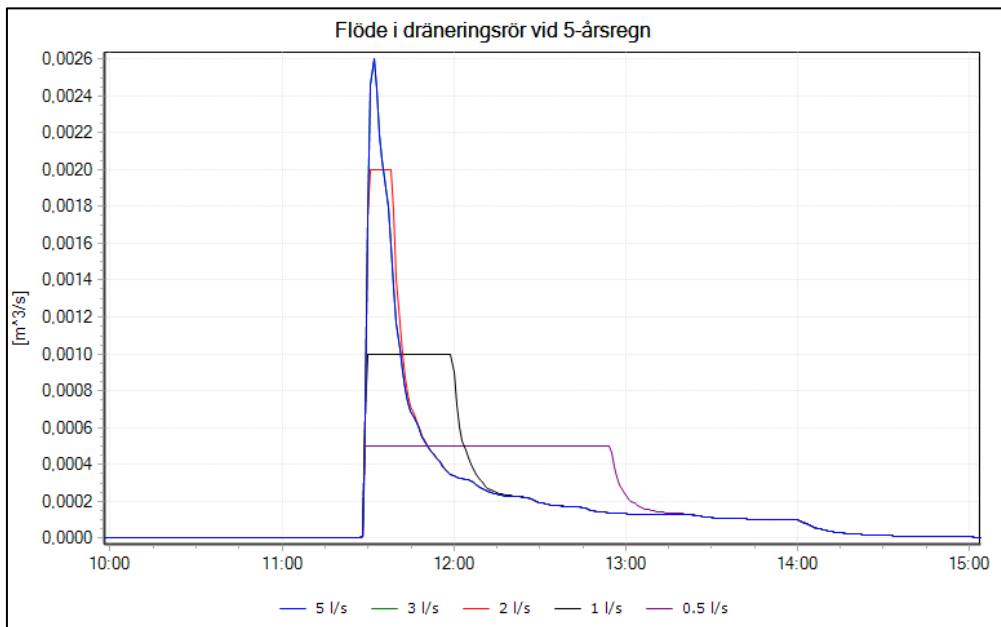
Vid simulering av ett 5-årsregn med fyra timmars varaktighet svämmade brunnen som var kopplad till det största avrinningsområdet med en area på 240 m<sup>2</sup> över. Hos de 26 andra brunnarna steg inte vattennivån till den grad att brunnen svämmades över. För soakaway-modulen visar Figur 22 hur vattennivån stiger till 32 cm över botten vid en strypning av flödet till 0,5 l/s. Vid reglering av flödet till 3–5 l/s stiger vattennivån till drygt 25 cm över botten. Med en vattennivå som stiger till 32 cm över botten uppnås en fyllnadsgrad på 28 procent.



Figur 22 Vattennivå i skelettjorden vid ett 5-årsregn med fyra timmars varaktighet.

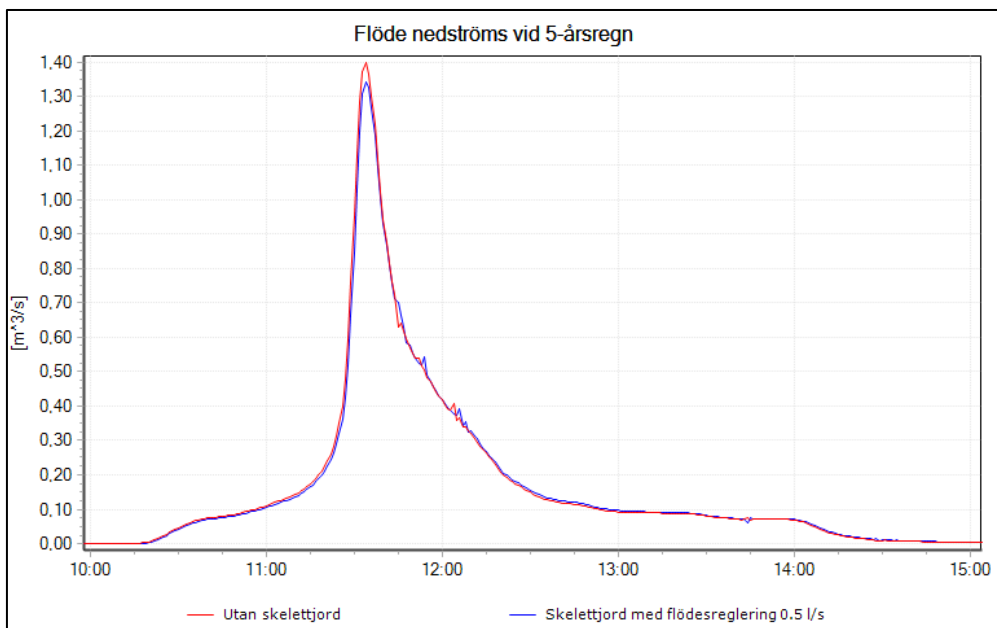
Vid reglerat flöde mellan 3–5 l/s uppnås ett flöde i dräneringsröret på knappt 2,6 l/s. Vid reglering av flödet mellan 0,5–2 l/s kan det i Figur 23 ses att flödet stannar på en plåt vid respektive flödesreglering.

Dräneringsröret var aktivt i ca 3 timmar oavsett strypning av flöde och flödet i röret upphörde ca 4,5 timmar efter regnets början.



Figur 23 Flöde i dräneringsröret vid ett 5-årsregn med fyra timmars varaktighet.

Flödet i röret nedströms då alla de 27 modulerna är påkopplade till ledningsnätet samt utan skelettjordsmoduler ses i Figur 24. Den redovisade hydrografen för skelettjordar är med en flödesreglering på 0,5 l/s och resulterar i en flödestopp på 1343 l/s.



Figur 24 Flöde i röret nedströms vid simulering av ett 5-årsregn med och utan skelettjord.

Installationen av de 27 skelettjordsmodulerna resulterar i en minskning av toppflödet i röret nedströms med 56 l/s, vilket motsvarar en minskning med 4 procent jämfört med utan skelettjordar. Likt Figur 24 visar Tabell 10 att ingen fördröjning uppnås. De resulterande värdena är för tidssteg på en minut.

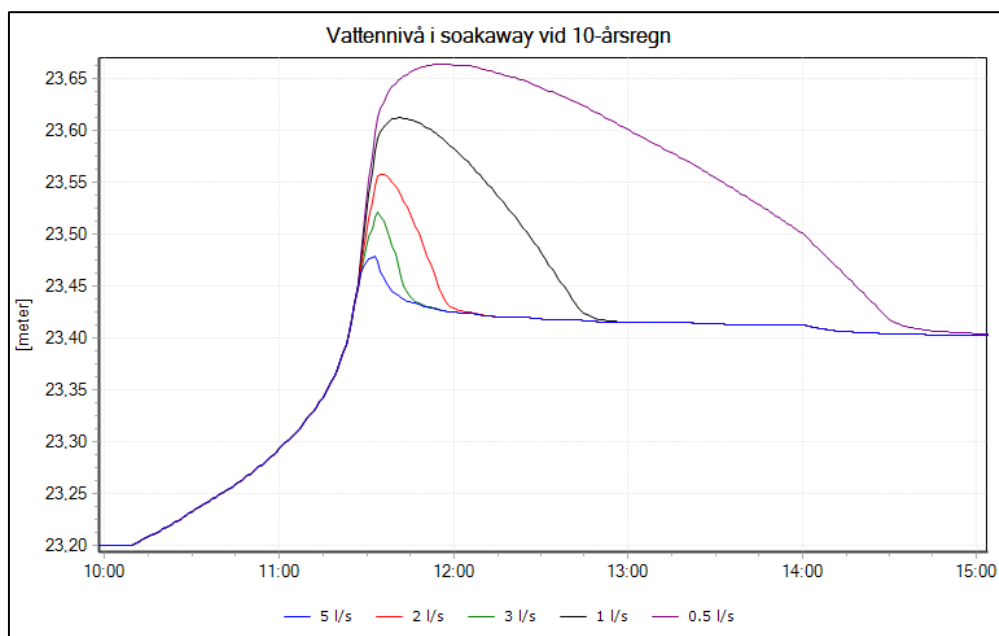
Tabell 10 Sammanfattande tabell med resultat för ett 5-årsregn med fyra timmars varaktighet och en flödesreglering på 0,5 l/s.

	Toppflöde (l/s)	Tidpunkt för flödestopp	Ackumulerat flöde (m <sup>3</sup> )	Ackumulerat flöde från dräneringsrör (m <sup>3</sup> )
Utan SKJ	1399	11:34	3104	-
Med SKJ	1343	11:34	3069	90
Δ	56	0	35	-
Δ (%)	4,0	-	1,1	-

Genom integration av flöden i röret nedströms kan det ses att inkluderandet av skelettjordar genererar en minskning av flödesvolymen på  $35 \text{ m}^3$ . Av de  $3069 \text{ m}^3$  som flödar genom röret nedströms är det  $90 \text{ m}^3$  (2,9 procent) som kommer ifrån skelettjordarna och dess dräneringsrör.

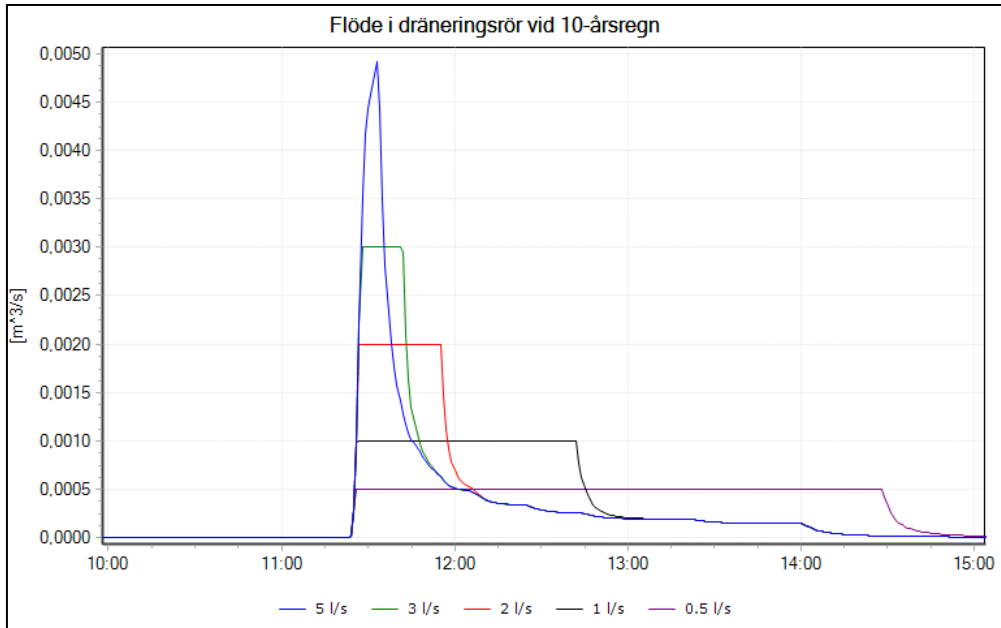
#### 4.4.3 10-årsregn

Vid simulering av ett 10-årsregn med fyra timmars varaktighet svämmade 17 av de 27 brunnarna över. De brunnar som inte svämmade över var kopplade till ett avrinningsområde med en area mindre än  $147 \text{ m}^2$ . För soakaway-modulerna kunde flödet regleras ned till  $0,5 \text{ l/s}$  utan att vattennivån översteg dess djup. I Figur 25 kan det ses hur vattennivån då stiger till  $46 \text{ cm}$  över botten vilket ger en fyllnadsgrad på 45 procent. För modulen som är kopplad till det största avrinningsområdet på  $240 \text{ m}^2$  uppnås en fyllnadsgrad på 76 procent vid reglerat flöde till  $0,5 \text{ l/s}$ .



Figur 25 Vattennivå i skelettjorden vid ett 10-årsregn med fyra timmars varaktighet.

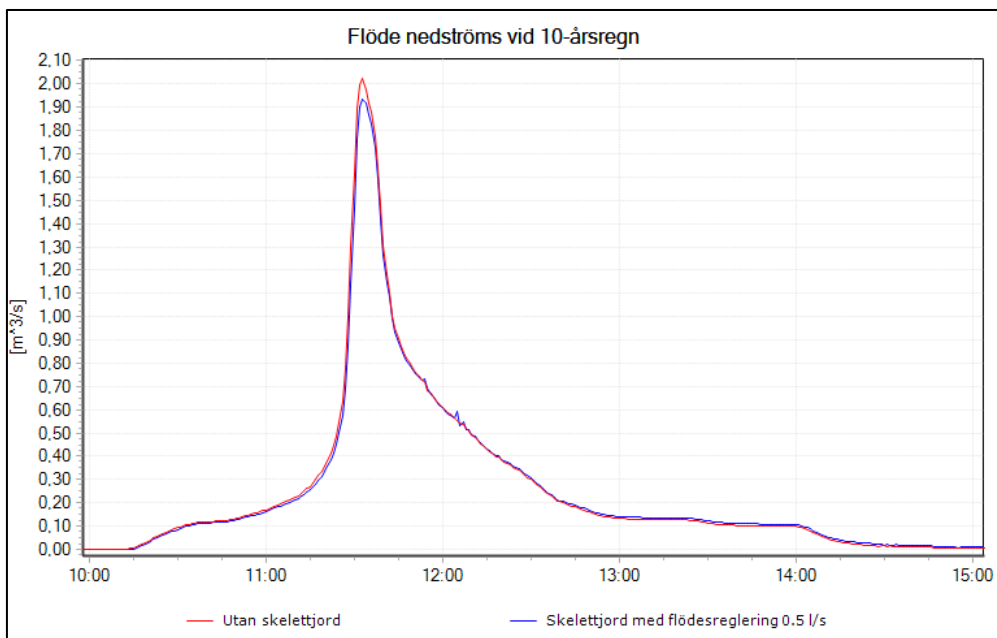
I Figur 26 ses att en strypning av flödet till 0,5 l/s gav upphov till att dräneringsröret var aktivt i ca 3,5 timmar, 30 minuter längre än vid simuleringar med flödesreglering mellan 1–5 l/s. Vid reglerat flöde till 0,5 l/s upphörde flödet i röret ca 5 timmar efter regnets början.



Figur 26 Flöde i dräneringsröret vid ett 10-årsregn med fyra timmars varaktighet.

Flödet i ledningen nedströms då alla de 27 modulerna är påkopplade till ledningsnätet samt utan skelettjordsmoduler ses i Figur 27. Den redovisade hydrografen med skelettjordar är med en flödesreglering på 0,5 l/s och resulterar i en flödestopp på 1937 l/s. De två graferna följer varandra och visar ingen antydning till en fördröjning av flödestoppen.





Figur 27 Flöde i röret nedströms vid simulering av ett 10-årsregn med och utan skelettjordar.

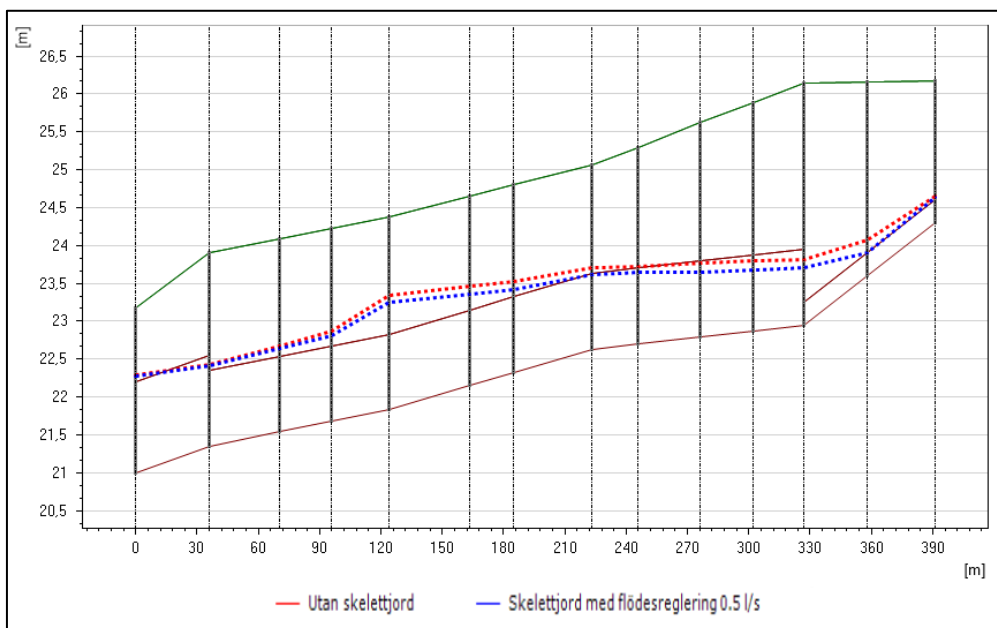
Installationen av de 27 skelettjordsmodulerna resulterar i en minskning av toppflödet i röret nedströms med 88 l/s, vilket motsvarar en minskning med 4,4 procent jämfört med utan skelettjordar. Likt Figur 27 visar Tabell 10 att ingen fördröjning uppnås. De resulterande värdena är för tidssteg på en minut.

Table 11 Sammanfattande tabell med resultat för ett 10-årsregn med fyra timmars varaktighet och en flödesreglering på 0,5 l/s.

	Toppflöde (l/s)	Tidpunkt för flödestopp	Ackumulerat flöde (m <sup>3</sup> )	Ackumulerat flöde från dräneringsrör (m <sup>3</sup> )
Utan SKJ	2025	11:33	4720	-
Med SKJ	1937	11:33	4684	158
Δ	88	0	36	-
Δ (%)	4,4	-	0,78	-

Genom integration av flöden i röret nedströms kan det ses att inkluderandet av skelettjordar genererar en minskning av flödesvolymen på 38 m<sup>3</sup>. Av de 4680 m<sup>3</sup> som flödar genom röret nedströms är det 158 m<sup>3</sup> (3,4 procent) som kommer ifrån skelettjordarna och dess dräneringsrör.

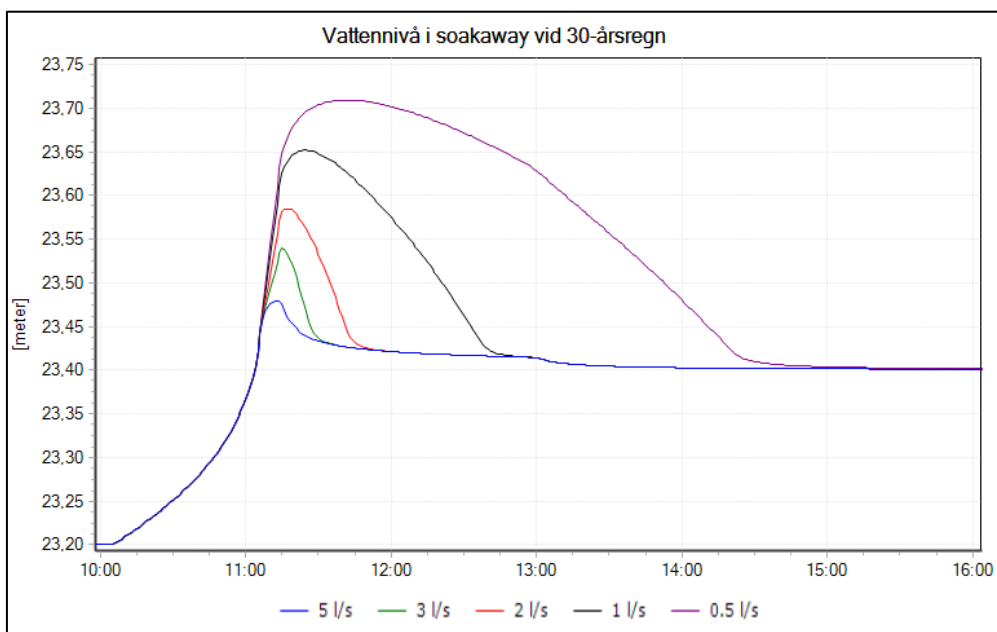
Den högsta trycklinjen vid simulering med och utan skelettjordar analyserades och kan ses i Figur 28 nedan. Den visar den högsta vattennivå som nås brunnarna under simuleringen. Vid simuleringen med skelettjordar där flödet reglerats till 0,5 l/s ses att trycklinjen ligger på en lägre nivå jämfört med simuleringen där skelettjordarna exkluderats.



Figur 28 Trycklinjen vid simulering av ett 10-årsregn med och utan skelettjordar.

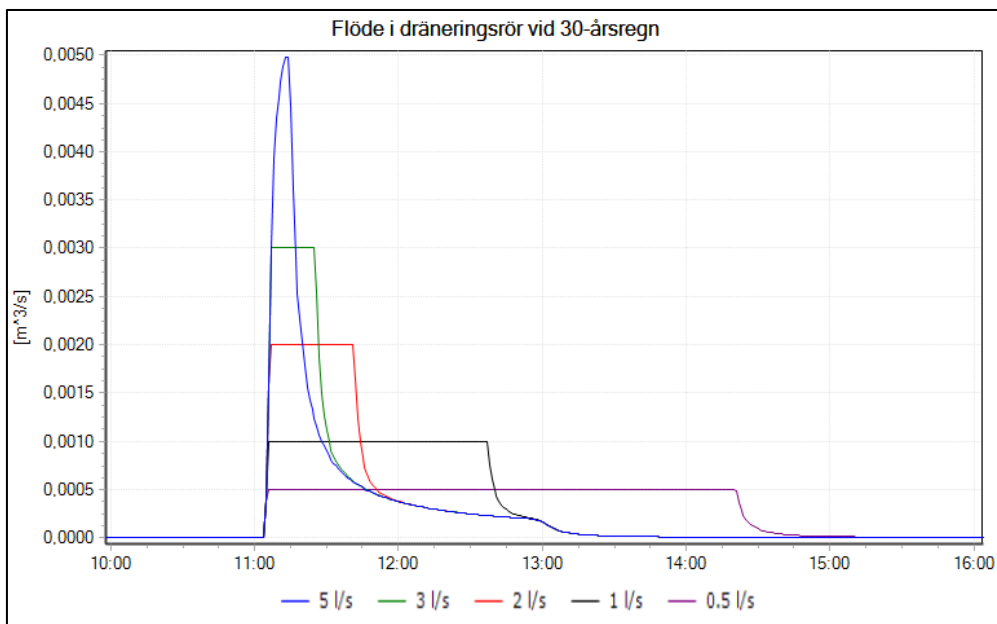
#### 4.4.4 30-årsregn

Vid simulering av ett 30-årsregn med tre timmars varaktighet svämmade 10 av de 27 brunnarna över. De brunnar som inte svämmade över var kopplade till ett avrinningsområde med en area mindre än 164 m<sup>2</sup>. I Figur 29 kan det ses hur vattennivån stiger till 51 cm över botten när flödet regleras till 0,5 l/s, vilket ger en fyllnadsgrad på 52 procent. För modulen som är kopplad till det största avrinningsområdet på 240 m<sup>2</sup> uppnås en fyllnadsgrad på 86 procent vid reglerat flöde till 0,5 l/s.



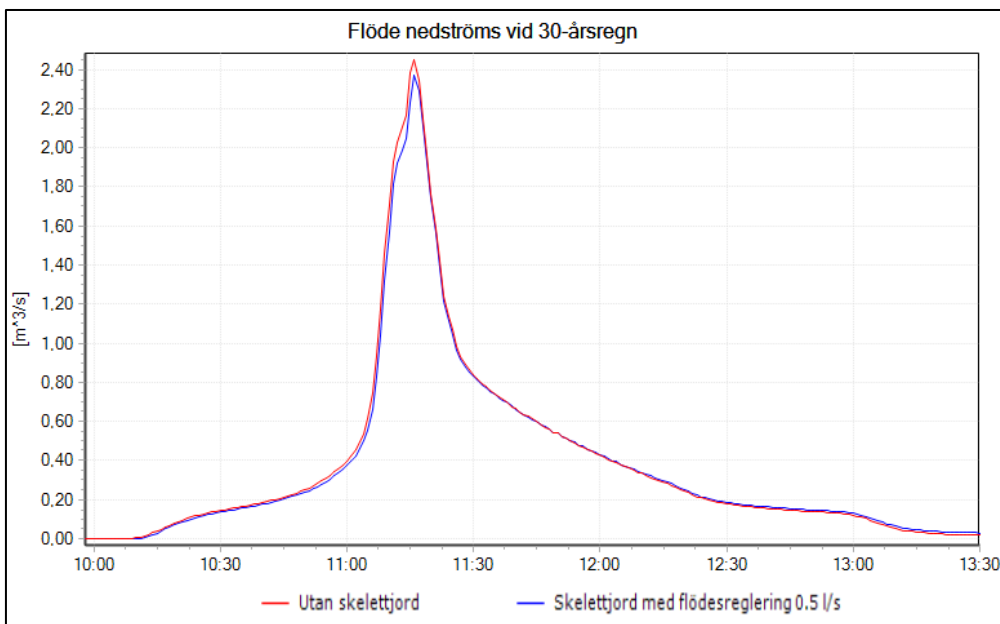
Figur 29 Vattennivå i skelettjorden vid ett 30-årsregn med tre timmars varaktighet.

I Figur 30 ses att en strypning av flödet till 0,5 l/s gav upphov till att dräneringsröret var aktivt i ca 4 timmar, en timme längre än vid simuleringar med flödesreglering mellan 1–5 l/s. Vid reglerat flöde till 0,5 l/s upphörde flödet i röret ca 5 timmar efter regnets början.



Figur 30 Flöde i dräneringsröret vid ett 30-årsregn med tre timmars varaktighet.

Flödet i ledningen nedströms då alla de 27 modulerna är påkopplade till ledningsnätet samt utan skelettjordsmoduler ses i Figur 31. Den redovisade hydrografen med skelettjordar är med en flödesreglering på 0,5 l/s och resulterar i en flödestopp på 2371 l/s. De två graferna följer varandra och visar ingen antydning till en fördröjning av flödestoppen.



Figur 31 Flöde i röret nedströms vid simulering av ett 30-årsregn med och utan skelettjordar.

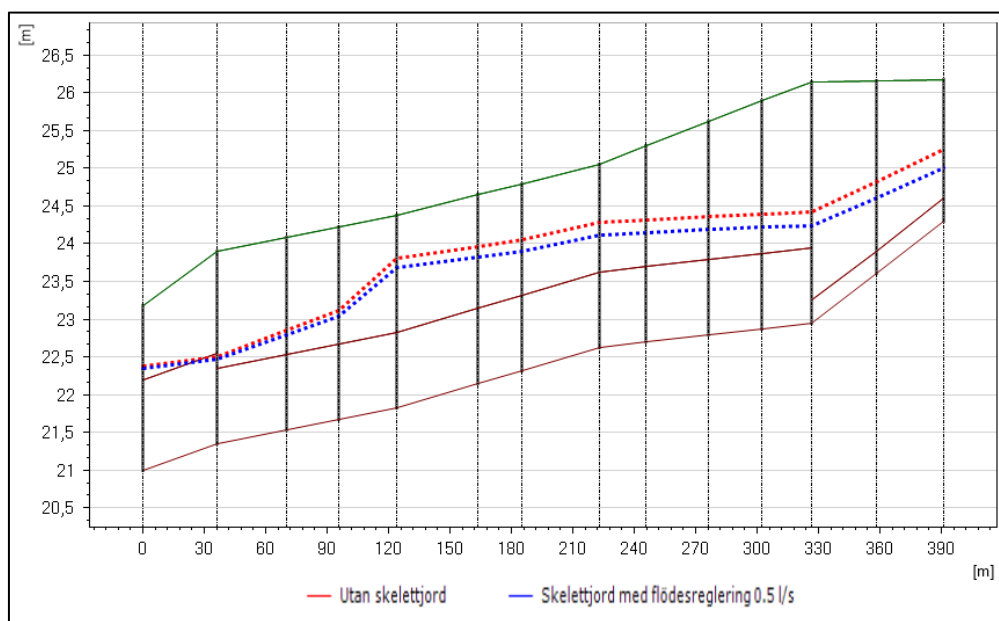
Installationen av de 27 skelettjordsmodulerna resulterar i en minskning av toppflödet i röret nedströms med 79 l/s, vilket motsvarar en minskning med 3,2 procent jämfört med utan skelettjordar. Likt Figur 31 visar Tabell 12 att ingen fördröjning uppnås. De resulterande värdena är för tidssteg på en minut.

Tabell 11 Sammanfattande tabell med resultat för ett 10-årsregn med fyra timmars varaktighet och en flödesreglering på 0,5 l/s.

	Toppflöde (l/s)	Tidpunkt för flödestopp	Akkumulerat flöde (m <sup>3</sup> )	Akkumulerat flöde från dräneringsrör (m <sup>3</sup> )
Utan SKJ	2450	11:16	4965	-
Med SKJ	2371	11:16	4924	168
Δ	79	0	41	-
Δ (%)	3,2	-	0,82	-

Genom integration av flöden i röret nedströms kan det ses att inkluderandet av skelettjordar genererar en minskning av flödesvolymen på 41 m<sup>3</sup>. Av de 4924 m<sup>3</sup> som flödar genom röret nedströms är det 168 m<sup>3</sup> (3,4 procent) som kommer ifrån skelettjordarna och dess dräneringsrör.

I Figur 32 nedan ses den högsta trycklinjen i brunnarna vid simulering med och utan skelettjordar. Vattennivån i brunnarna överstiger inte marknivån vid någon av de två simuleringarna och inkluderandet av skelettjordar kan ses ge en något lägre trycklinje. Ledningen i gatan har dimensionerats för att kunna hantera ett 30-årsregn utan att marköversvämning sker och skelettjordarna bedöms därmed ge en säkerhetsmarginal.



Figur 32 Trycklinjen vid simulering av ett 30-årsregn med och utan skelettjordar.



## 5 Diskussion

### 5.1 Resultat

De resultat som presenteras för respektive CDS-regn är storleken på flödestoppen, tidpunkt för flödestoppen, flödesvolym samt trycklinjen vid 10- och 30-årsregnen. Oavsett vilket regn som simuleringen körts med tycks resultaten vara relativt jämna. Inkluderandet av skelettjordskonstruktionerna ger en reducering av toppflödet med runt fyra procent och en reducering av den totala volymen med ca en procent. För den ackumulerade flödesvolymen i röret nedströms syns en svag indikation på att inkluderandet av modulerna ger en aningen större procentuell reduktion vid mindre regn. Detta då reduceringen ligger på 1,8 procent vid 2-årsregnet, 1,1 procent vid 5-årsregnet och runt 0,8 procent vid 10- och 30-årsregnen. De här resultaten kan också förväntas med modellens uppbyggnad där dräneringsrörets höjd över botten gör att en del av volymen aldrig når ledningsnätet via dräneringsröret. Vid analys av grafen med vattennivån i soakaway-modulen för ett 2-årsregn ses att vattennivån bara stiger några centimeter över dräneringsrörets höjd och att majoriteten av det vatten som rinner in i modulen stannar där. Men även om den procentuella reduceringen av flödesvolymen är som störst vid 2-årsregnet är reduceringen liten. Det gäller även för de andra resultaten och kan förklaras med att avrinningen till skelettjordarna helt enkelt är för liten i jämförelse med den totala volymen i röret nedströms. Förutom från avrinning från gatan i studieområdet får den studerade ledningen även bidrag från tre andra källor.

För tidpunkten av flödestoppen är det ingen skillnad vid simulering med eller utan soakaway-moduler vilket gäller för alla de fyra CDS-regnen. Vad det kan bero på är svårt att säga utan mätdata men bedöms kunna ha tre olika förklaringar. En är att det bidragande flödet från dräneringsrören inte är tillräckligt stort i jämförelse med det totala flödet i ledningen för att fördröja flödestoppen. Den andra är att det är möjligt att en fördröjning av toppen sker men att den är för liten för att uppfattas av tidsstegen på en minut. En tredje är att inställningarna för skelettjordskonstruktionerna är felaktiga med konsekvensen att förloppet från avrinning till flöde i dräneringsröret sker snabbare än vad det bör göra.



Med resultaten från simuleringarna bedöms den första förklaringen ha störst betydelse där flödet från dräneringsrören är för litet i förhållande till det totala flödet för att generera en fördröjning. Det utesluter dock inte de andra två förklaringarna.

Det ska även tas i beaktning att bidraget från kvartersmark redan har fördröjts enligt Stockholms stads åtgärdsnivå på 20 mm. Även om det finns osäkerheter vid hur stort inflöde som är möjligt till konstruktionen och att en eventuell hårdare reglering än 5 l/s hade gett upphov till en ökad fördröjning, finns det argument för att hävda att en funktion för rening är att prioritera över fördröjning i det här fallet. Dess bidragande volym till ledningsnätet bedöms vara för liten för att ha en betydande påverkan på ledningsnätets hydrauliska belastning. Hur stor reningspotential skelettjordskonstruktioner har vid anläggning längs denna gata har inte undersökts vid denna studie. Men även om en dimensionering görs med funktion för rening som primärt syfte, kan fortfarande en sekundär funktion för fördröjning uppnås. De här resultaten är specifika för denna fallstudie och under andra omständigheter på en annan plats är det möjligt att skelettjordarna har en större effekt och potential för fördröjning.

Vid analys av trycklinjerna går det att se att simulering med skelettjordar ger en lägre trycklinje än utan skelettjordar. Men sänkningen av trycklinjen bedöms inte vara till den grad att en lägre dimension på röret kan användas och ses istället som en ökad kapacitet i röret. Det är möjligt att en ökad detaljeringsgrad med soakaway-moduler i gator uppströms skulle kunna ge upphov till en större sänkning av trycklinjen. Om det också skulle visa sig sänka trycklinjen i rören uppströms är det möjligt att hela systemet skulle kunna utformas med en lägre dimension. Detta har dock inte undersökts i den här studien och är enbart en spekulation i dagsläget.

Med antagandet om att soakaway-modulerna och den uppbyggda modellen är en god representation av verkligheten med skelettjordar, visar resultaten att installationen av modulerna har en reducerande effekt för belastningen på ledningsnätet. En kan därmed ställa sig frågan om modeller bör göras mer detaljerade för att ta med anläggningar som likt skelettjordar har en förmåga att fördröja och reducera flöden? Bör de tas hänsyn till vid dimensionering eller ses som en extra kapacitet och säkerhetsmarginal? Det är frågor som kan undersökas mer vid framtida studier.

I en större modell likt den erhållna modellen för Barkarbystaden är det möjligt att inkludera mindre och fler detaljer ger en arbetsmängd och kostnad som inte är motiverbar. För att avgöra det behövs dock en kostnadsanalys för hela processen göras där även senare skeden tas i beaktning. Är det möjligt att en ökad kostnad med en mer detaljerad modell är motiverbar om det leder till att mindre dimensioner kan användas och därmed ge en mindre kostnad vid anläggning? Det kräver då också att det finns en beprövad metod som beskriver hur dessa detaljlösningar ska utformas i modellen för att resultaten ska vara tillförlitliga.

Ett alternativ som kan ses som en kompromiss mellan att modellera med eller utan flera skelettjordsmoduler likt den här studien är att använda sig av en modul för att representera flera enheter. Då kan den förväntade funktionen hos konstruktionerna och dess påverkan tas med vid dimensionering av ledningsnätet samtidigt som arbetsmängden reduceras jämfört med att modellera enskilda anläggningar. Ett exempel då detta gjorts är en fallstudie som visade att en modul som representerar flera enheter kan uppvisa snarlika resultat som då alla enheter inkluderas var för sig. Felmarginalen som uppstår då flera enheter klumpas ihop bedömdes där ha en mindre påverkan på resultatet än osäkerheten kring andra parametervärden i modellen (Roldin, Mark, Kuczera, Mikkelsen & Binning 2012). Det finns därmed en möjlighet att öka detaljeringsgraden i modeller utan gå till den grad att varje enskilda detalj inkluderas. Men som nämnt tidigare vore det fördelaktigt att utföra fler studier kring detta som kan ge ett underlag för en beprövad arbetsgång för att inkludera infiltrationslösningar i modeller.

Att det finns ett intresse för skelettjordskonstruktioner och att dess multifunktionalitet är uppskattad går att tyda från intervjuerna. Då det är en relativt ny anläggning finns det dock mycket som går att utreda kring dem och dess funktion, samt nya frågor som kan dyka upp. Vad som kan frågas är hur representativ den här studien med fem intervjuade personer är? Av de fem intervjuade var en från södra Sverige, en från västra och tre från Stockholmsregionen. Hur situationen för skelettjordar ser ut i norra Sverige undersöktes därmed inte i den här studien men skulle vara intressant att utreda då klimatet skiljer sig mellan regionerna. Har det kallare klimatet i norra Sverige en påverkan på skelettjordars funktion och användning? Sedan kan det även frågas huruvida svaren på frågorna hade skiljt sig om det var en annan person med en annorlunda yrkesroll och bakgrund som blev intervjuad?

Som Person Nr. 1 nämner kan det skilja sig hur trafikkontoret och exploateringskontoret i Stockholms stad ser på skelettjordskonstruktioner och vilken funktion som de ses fylla. Det skulle därmed ha varit intressant att intervjua minst två personer från varje kommun med olika yrkesroller för att se om svaren kan kopplas till kommunen eller om deras tekniska bakgrund har en påverkan på deras svar. Från den här studien med de fem intervjuade kunde ingen slutsats kring det dras utan resultatet gav mer utav en överblick av den befintliga situationen hos de olika kommunerna.

## 5.2 Modelluppbyggnad

Utan mätdata att utgå från för infiltrationen till skelettjordskonstruktionen har en flödesreglering på 5 l/s för infiltrationsröret använts. Men det är dock oklart hur snabbt dagvattnet egentligen kan fördelas ut i skelettjorden via det eller en luftningsbrunn. Som Alm (2005) beskriver är det inte den tillgängliga porvolymen som begränsar dess hydrauliska kapacitet, utan förmågan att transportera in vatten i skelettjorden. Det överensstämmer med resultaten från simuleringarna när en ser till fyllnadsgraden på soakaway-modulerna. Vid simuleringen med ett 30-årsregn med tre timmars varaktighet erhöles en fyllnadsgrad på 52 procent för modulen som var kopplad till ett avrinningsområde på 156 m<sup>2</sup>. Där understiger vattennivån markytan med en liten marginal och brunnen är nära på att svämma över. Då skelettjordskonstruktionen enbart är fylld till hälften är det tydligt att det finns outnyttjad kapacitet för att magasinera mer vatten. Det kan därför vara önskvärt att uppnå en sådan lösning där kapaciteten för att transportera in mer vatten i skelettjorden ökas. Då skulle det även kunna vara möjligt att leda dit vatten från andra områden för lokal magasinering i skelettjordskonstruktionen.

Antagandet om ett maximalt inflöde på 5 l/s bygger på grova antaganden då data om inflödet saknas och det är därför svårt att bedöma om en anläggning med kolmakadam ger upphov till samma resultat som modellen. Modellerings är just det som dess namn antyder, en modell av verkligheten. Utan data som säger hur det ser ut i verkligheten, är det svårt att verifiera huruvida de resultat som modellen producerar är en god representation av verkliga förhållanden. Det innebär dock inte att de resultat som är med en teoretisk grund utan verifikation från data är betydelselös.

I det här fallet för studieområdet i Barkarbystaden går det att se att inkluderandet av skelettjordar ger en viss reducering av belastningen på ledningsnätet men att reduceringen är relativt liten i förhållande till flödet och belastningen från andra källor. Det förändras inte även om en kalibrering av skelettjordskonstruktionerna görs med mätdata. Ett alternativ till att använda en flödesreglering för infiltrationsröret är att sänka flödet genom att ange ett lägre M-värde i röret. Men för att avgöra vilken metod som ger det mest korrekta resultatet behövs dock mätdata att jämföra med.

Vid både 10- och 30-årsregnen svämmar brunnar över då avrinningen överstiger deras förmåga att transportera in vatten i skelettjordskonstruktionen. Om data visar att 5 l/s är ett för generöst antagande och det egentliga flödet som anläggningen kan infiltrera är mindre, kommer med stor sannolikhet fler brunnar att svämma över. Vad som även bör kommenteras är modellens tillvägagångssätt att skapa ett tillfälligt magasin då en brunn svämmas över. Genom att magasinera vatten temporärt tills vattennivån i brunnen sjunkit, fördröjs troligtvis vatten som egentligen rinner vidare nedströms eller direkt till det konventionella ledningsnätet. På så sätt kan det skapas en falsk fördröjning och minskad belastning på ledningsnätet än vad som egentligen åstadkoms. I modellväg skulle det kunna vara möjligt att åtgärda genom användning av en kopplad modell där vattnet som svämmar över i brunnar rinner vidare nedströms eller installera en bräddningsfunktion i modellen.

För dräneringsröret varierades flödesregleringen mellan 0,5 – 5 l/s vilket togs från uppgifter från producenter. Men hur lämpligt det är att använda en flödesreglering på 0,5 l/s i anläggningar som dessa har inte utretts. Att använda en flödesregulator med en liten flödesreglering som 0,5 l/s kan innebära risker som igensättning av regulatorn på grund av små partiklar. Ett ökat flöde i dräneringsröret resulterar i en lägre uppehållstid för vattnet i skelettjorden och en ökad belastning på ledningsnätet.

I denna studie har enbart MIKE URBAN+ använts och huruvida andra programvaror har funktioner som passar för modellering av skelettjordskonstruktioner har inte undersökts. Vad som särskiljer soakaway-modulen och dess funktion jämfört med andra noder är dess porositet samt infiltration.

Men i denna studie har en hydraulisk konduktivitet för lerig morän använts vilken i princip kan jämföras med noll och funktionen med infiltration har därmed försumats. Själva magasineringsskapaciteten hos en skelettjordskonstruktion bör därmed i en situation likt denna kunna gestaltas av ett vanligt magasin där volym sätts till den tillgängliga porvolymen. Inställningen för porositet i modellen har dock en påverkan för beräkningen av vattennivån i skelettjorden vilket kan ha en betydelse i vissa fall. I känslighetsanalysen kan det ses hur en ändring av den hydrauliska konduktiviteten påverkar resultatet vid simulering.

Att en ökad hydraulisk konduktivitet och därmed också exfiltration ut ur soakaway-modulen ger en minskad flödesvolym i dräneringsröret är väntat och önskvärt i de fall där det är möjligt.

### **5.3 Framtida studier**

Då data saknas för kalibrering och validering av modellen föreslås att liknande studier görs där mätdata inhämtas. Datan bör bestå av nederbörd och beroende på skelettjordskonstruktionens utformning, vattennivå i brunn, flöden i rör och om möjligt, vattennivå i skelettjorden. Studier på skelettjordarnas reningsförmåga bör också undersökas för att klargöra dess kapacitet för dagvattenhantering. Som nämnt ovan vore det intressant att utföra en större studie med intervjuer där fler regioner tas med för att se om det finns en skillnad på hur skelettjordskonstruktioner hanteras i Sverige.

## 6 Slutsats

Det finns olika varianter av skelettjordskonstruktioner i Sverige idag varav två är skelettjord enligt Stockholmsmetoden och en uppbyggnad med kolmakadam eller BGG-system. De har båda gemensamt att dess uppbyggnad med en porös struktur ger utrymme till trädens rötter och en bärighet som motverkar kompaktion vid ovanliggande belastning. Det som bedöms begränsa dess förmåga att hantera dagvatten är kapaciteten att transportera in vatten i anläggningen. Med sin bärförmåga kan skelettjordskonstruktioner uppvisa en multifunktionalitet där de skapar gynnsamma förhållanden för träd, hanterar ovanliggande laster och hanterar dagvatten med funktion som rening och fördröjning. Då skelettjordarna vanligtvis anläggs i samband med väg är det ofta trafik- eller gatuavdelningen på kommunen som har ansvaret för dem. Påverkan på belastningen på ledningsnätet bedöms bero på hur stor del av det totala flödet i ledningsnätet som avleds till skelettjordarna. I fallstudien är det summerade flödet som leds via skelettjordskonstruktionerna till ledningsnätet för litet för att ha en påtaglig effekt på ledningsnätet. Men en viss reducering av flödesvolymen, flödestoppen och trycklinjen ges vilket bedöms kunna agera som en säkerhetsmarginal.



## 7 Källförteckning

Alm, Henrik. (2005). Skelettjord – att hantera trafikdagvatten i stadsmiljö. Stockholm: Stockholm Vatten AB. 2005 – 24.

Alvem, B-M. & Embrén, B. (2017). Växtbäddar i Stockholms stad – en handbok. Stockholms stad.

Andersson, J., Stråe, D., Svensson, G. (2016). PM Åtgärdsnivå för dagvatten i Stockholm. Stockholm Vatten, Stockholms Stad. WRS i samarbete med SP Urban Water. Rapport Nr: 2016-0752-A.

Armson, D., Stringer, P. och Ennos, A.R. (2013). The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3), ss.282-286.

Bartens, J., Day, S.D., Harris, J.R., Dove, J.E. & Wynn, T.M. (2008). Can urban tree roots improve infiltration through compacted subsoils for stormwater management?. *Journal of Environmental Quality*, 37(6), ss.2048-2057.

Berland, A., Shiflett, S.A., Shuster, W.D., Garmestani, A.S., Goddard, H.C., Herrmann, D.L. & Hopton, M.E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, ss.167-177.

Blomquist, D., Hammarlund, H., Härle, P. & Karlsson, S. (2016). Riktlinjer för modellering av spillförande system och dagvattensystem. Stockholm: Svenskt Vatten Utveckling. Rapport Nr: 2016-15

Dahlström, B. (2010). Regnintensitet – en molnfysikalisk betraktelse. Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2010-05.

DHI. (2020). MIKE URBAN+ Collection System - User Guide.

DHI. (2017). MIKE 1D - DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling (Reference manual).



Döse, M. & Schouenborg, B. (2017). Uppmätt hydraulisk konduktivitet på olika krossmaterial i laboratorium och infiltrationsmätningar på vägkonstruktioner i fält med god vattendrainerande förmåga. Vinnova. Diarienummer 2012-01271.

Edge. (2020). Levande gaturum – en handbok i Blågröngrå system

Elliott, R.M., Adkins, E.R., Culligan, P.J. & Palmer, M.I. (2018). Stormwater infiltration capacity of street tree pits: Quantifying the influence of different design and management strategies in New York City. *Ecological engineering*, 111, ss.157-166.

Espeby, B. & Gustafsson, J.P. 1998. Vatten och mnestransport I den omättade zonen. En kunskapsöversikt. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan. TRITA-AMI Rapport, 3038.

Hellman, Fredrik. (2017). Accelererad provning av dränerande markstensytor med HVS-utrustning. Vinnova. Diarienummer: 2012-01271

Larm, T. & Blecken, G. (2019). Utformning och dimensionering av anläggningar för rening och flödesutjämning av dagvatten. Svenskt Vatten AB. Rapport Nr: 2019-20

Larsson, R. (2008). Jords egenskaper. Statens Geotekniska Institut (SGI).

Lucke, T. and Beecham, S. (2019). An infiltration approach to reducing pavement damage by street trees. *Science of The Total Environment*, 671, ss.94-100.

Mohanty, S.K., Valenca, R., Berger, A.W., Iris, K.M., Xiong, X., Saunders, T.M. & Tsang, D.C. (2018). Plenty of room for carbon on the ground: potential applications of biochar for stormwater treatment. *Science of the total environment*, 625, ss.1644-1658.

MSB. (2017). Vägledning för skyfallskartering – Tips för genomförande och exempel på användning.

Naturvårdsverket (2017). Föroreningar i dagvatten. Naturvårdsverket.

Ordóñez-Barona, C., Sabetski, V., Millward, A.A. & Steenberg, J. (2018). De-icing salt contamination reduces urban tree performance in structural soil cells. *Environmental pollution*, 234, ss.562-571.

Roldin, M., Mark, O., Kuczera, G., Mikkelsen, P.S. & Binning, P.J. (2012). Representing soakaways in a physically distributed urban drainage model—Upscaling individual allotments to an aggregated scale. *Journal of hydrology*, 414, ss.530-538.

Stockholms stad. (2017). PM Beräkningsmetodik för dagvattenflöde och föroreningstransport.

Stockholms stad. (2016). Dagvattenhantering. Åtgärdsnivå vid ny- och större ombyggnation.

Svensk Markbetong. (2019). Beläggning med plattor och marksten av betong.

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

Szota, C., Coutts, A.M., Thom, J.K., Virahsawmy, H.K., Fletcher, T.D. & Livesley, S.J. (2019). Street tree stormwater control measures can reduce runoff but may not benefit established trees. *Landscape and urban planning*, 182, ss.144-155.

Thom, J.K., Szota, C., Coutts, A.M., Fletcher, T.D. & Livesley, S.J. (2020). Transpiration by established trees could increase the efficiency of stormwater control measures. *Water Research*, 173.

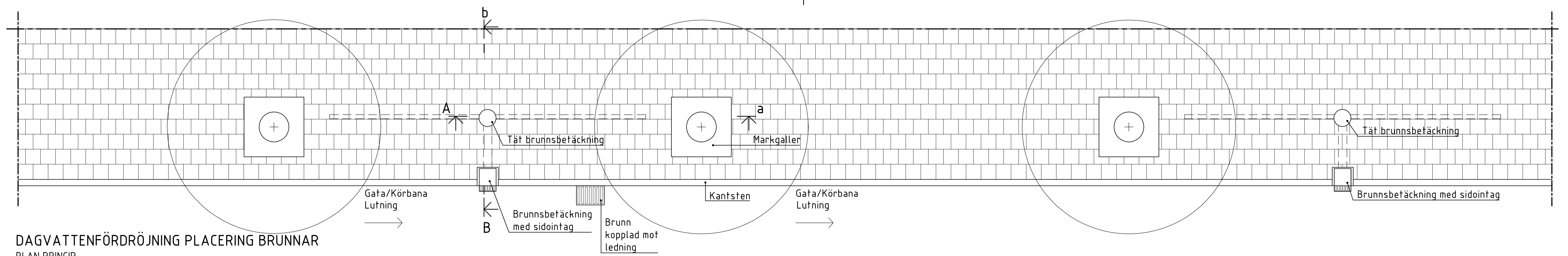
Tyréns. (2017). Dagvattenutredning - Detaljplan för Barkarbystaden III, Järfälla kommun.



## **Bilagor**

Bilaga 1: Stockholms stad - Träd i hårdgjord yta. Dagvattenfördröjning.  
Ritningsnummer THVB022

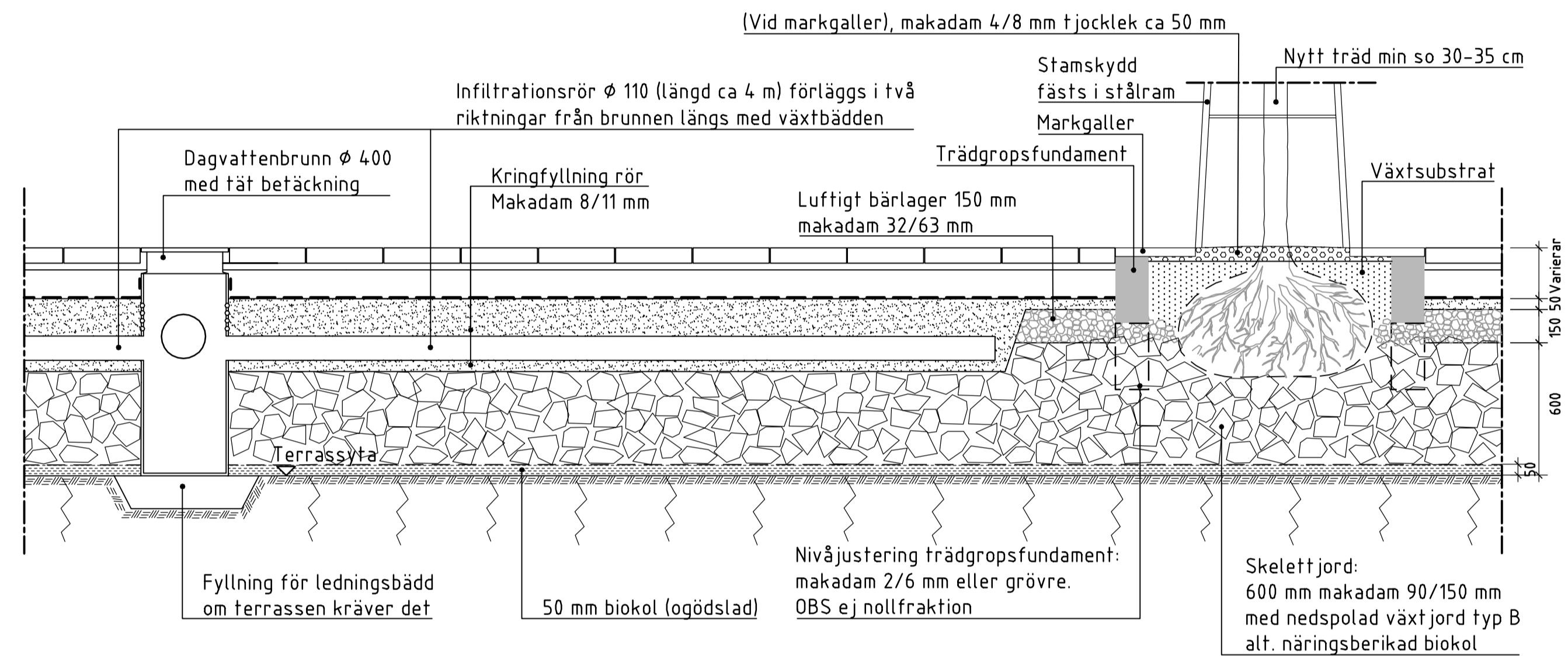
Bilaga 2: Nacka kommun – Typritning T10.



**DAGVATTENFÖRDRÖJNING PLACERING BRUNNAR**

PLAN PRINCIP

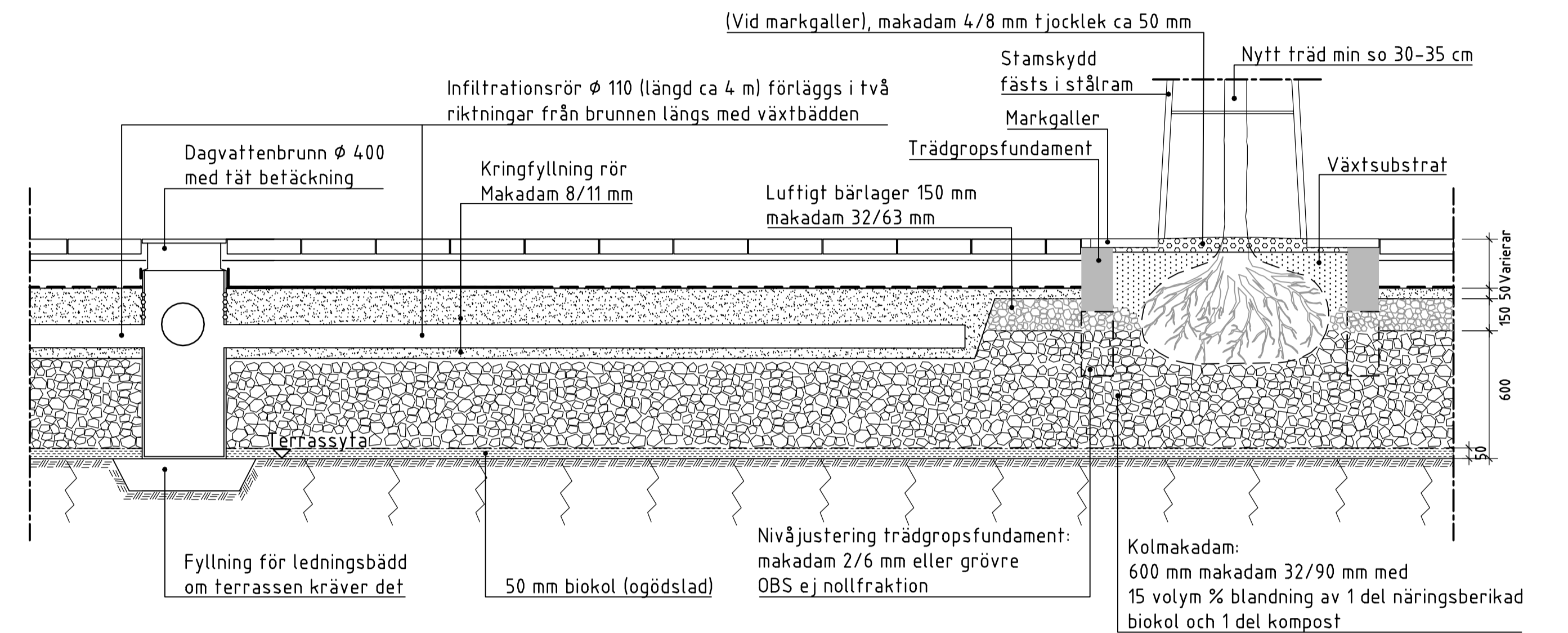
SKALA 1:50



**DAGVATTENFÖRDRÖJNING - HÄRDGJORD YTA MED SKELETTJORD**

PRINCIPSEKTION A-a

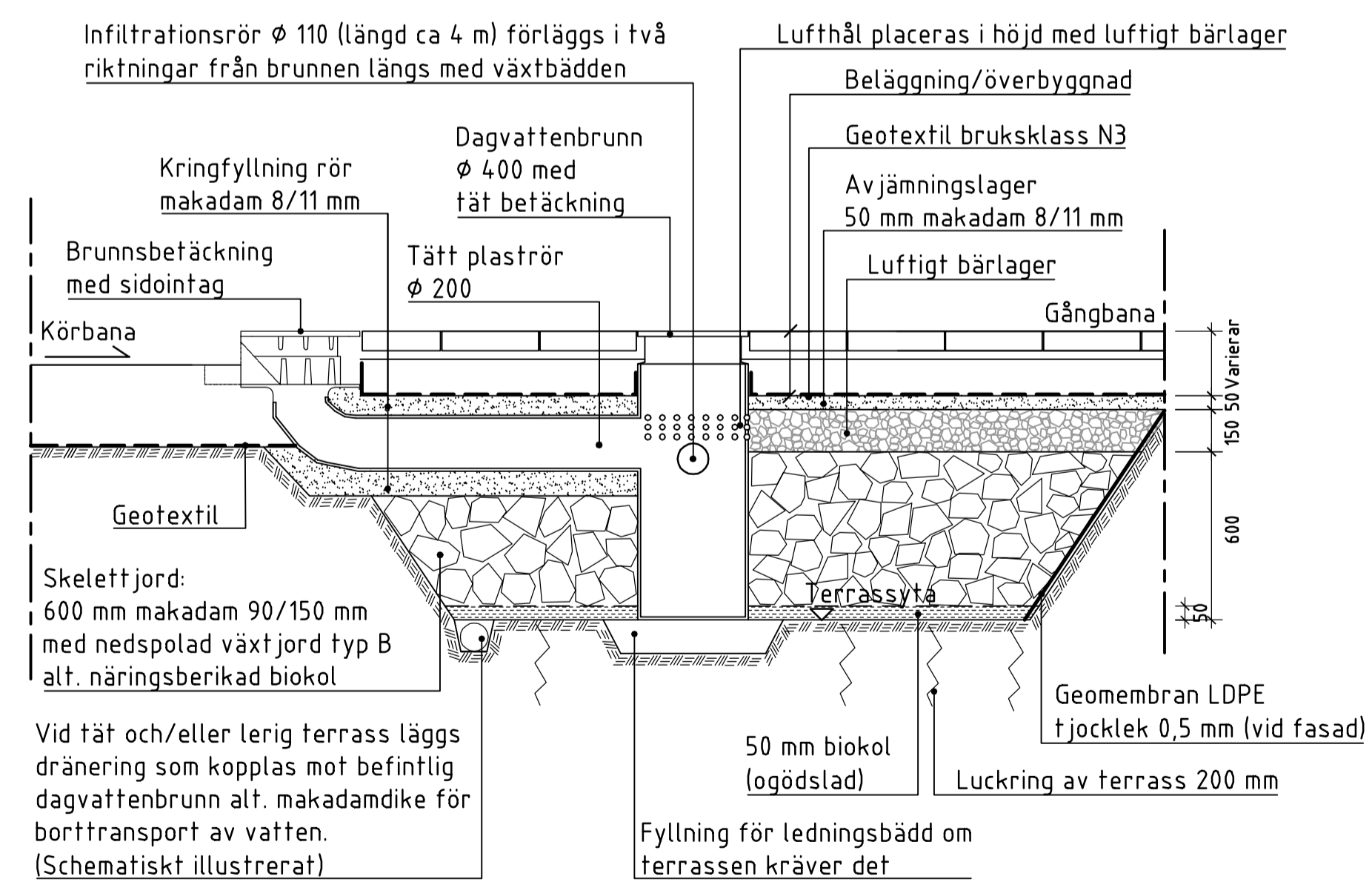
SKALA 1:20



**DAGVATTENFÖRDRÖJNING - HÄRDGJORD YTA MED KOLMAKADAM**

PRINCIPSEKTION A-a

SKALA 1:20



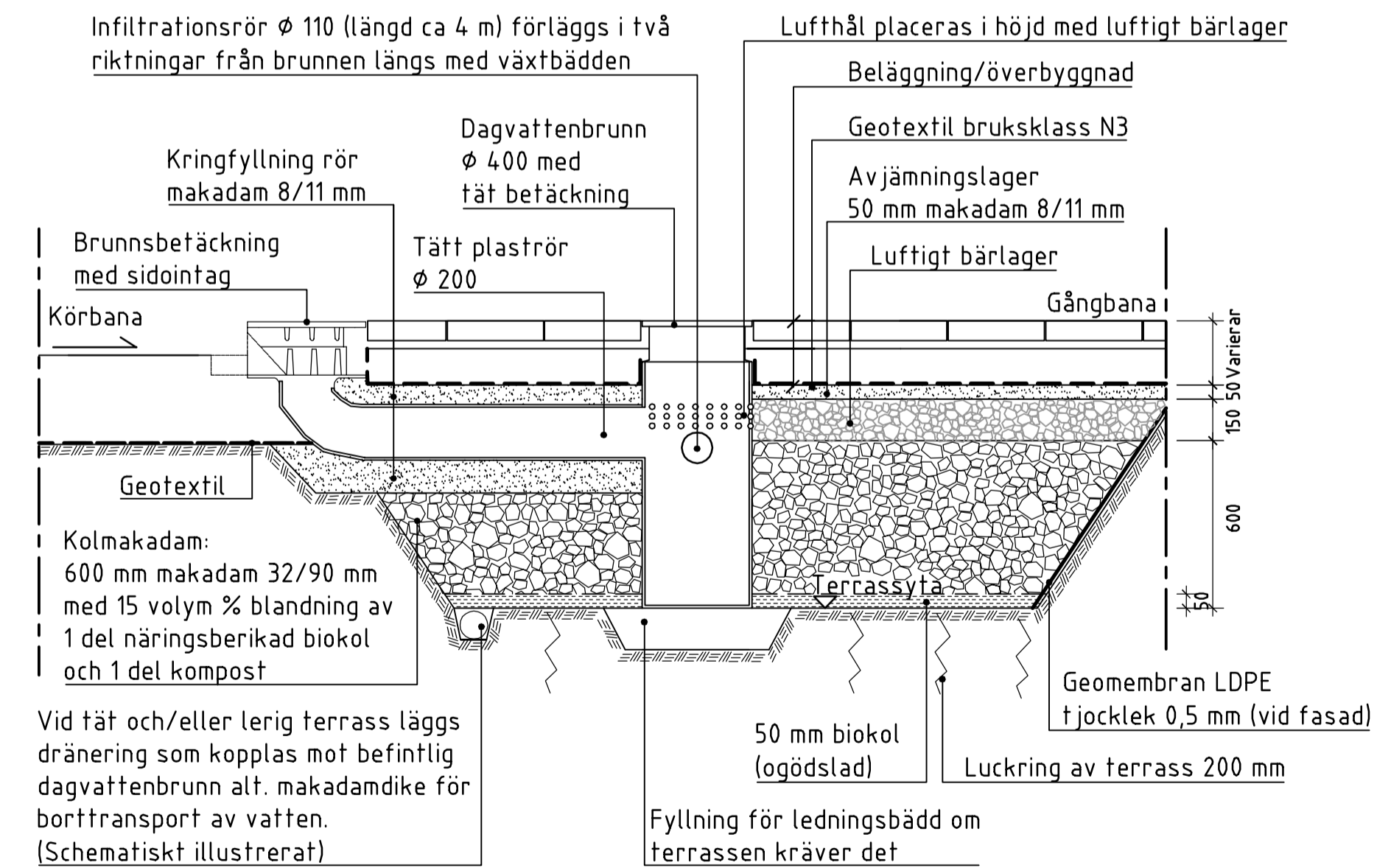
**DAGVATTENFÖRDRÖJNING - HÄRDGJORD YTA MED SKELETTJORD**

PRINCIPSEKTION B-b

SKALA 1:20

**ANMÄRKNING**

Växtjord typ B enligt Stockholm stads kornfördelningskurva.  
Åtgärder för terrassen anpassas efter dess beskaffenhet. Täta terrasser kan kräva dränering och allt för genomsläppliga terrasser kan behöva tätas. Luckring utförs om större genomsläpplighet önskas hos en kompakterad terrassyta.



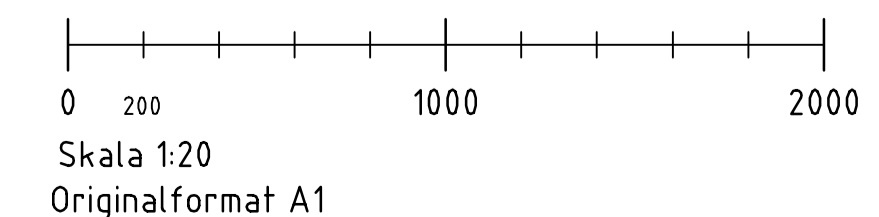
**DAGVATTENFÖRDRÖJNING - HÄRDGJORD YTA MED KOLMAKADAM**

PRINCIPSEKTION B-b

SKALA 1:20

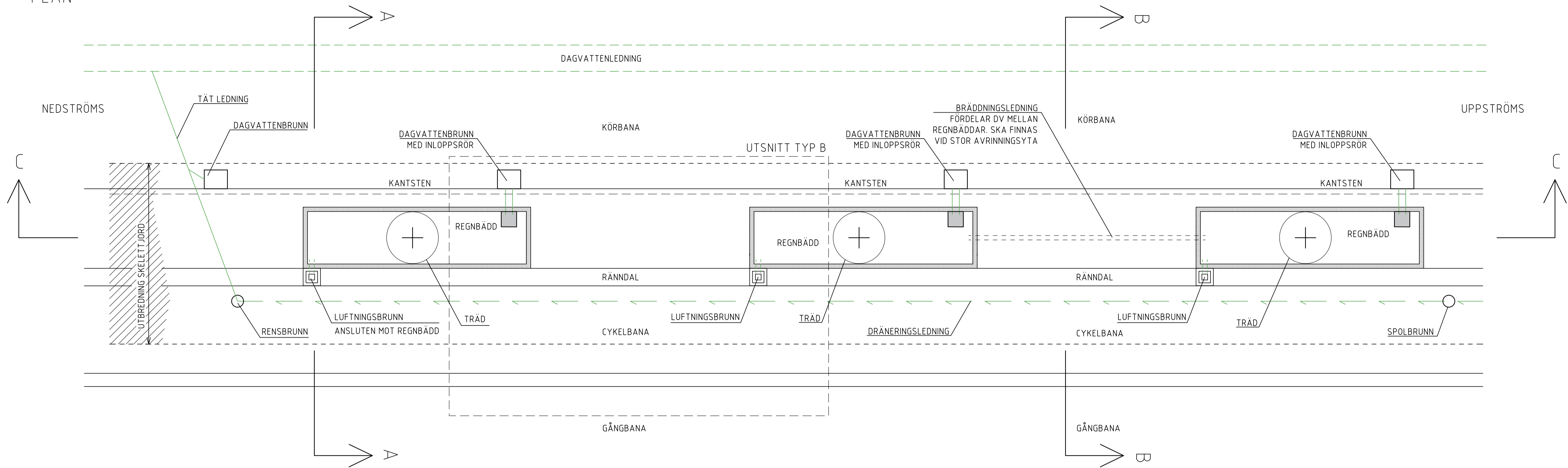
**ANMÄRKNING**

Åtgärder för terrassen anpassas efter dess beskaffenhet. Täta terrasser kan kräva dränering och allt för genomsläppliga terrasser kan behöva tätas. Luckring utförs om större genomsläpplighet önskas hos en kompakterad terrassyta.

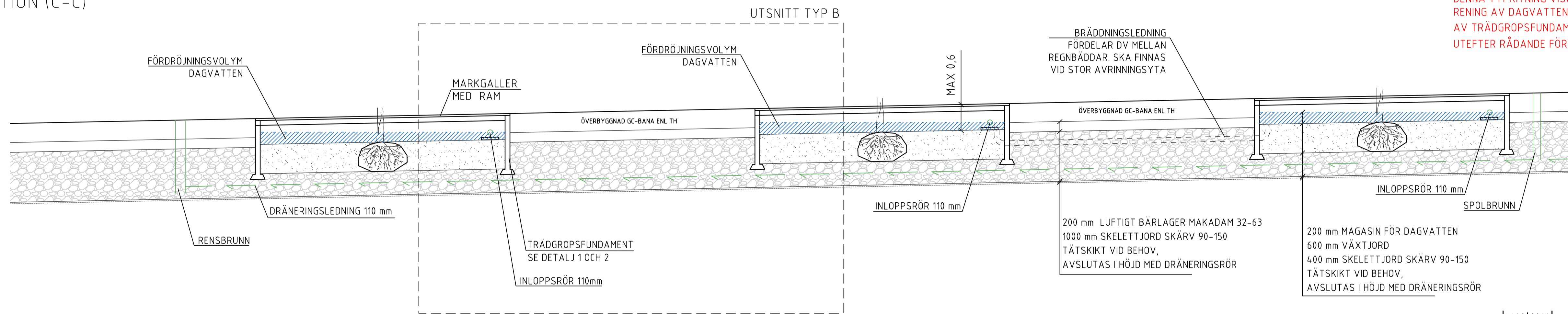


Status	2017-11-08
TH-TYPRITNING	Godkänd Britt-Marie Alvem
Stockholms stad	Trafikkontoret
TRÄD I HÄRDGJORD YTA DAGVATTENFÖRDRÖJNING	
SEKTION, PLAN	
Skala	Ritningsnr
1:20, 1:50 (A1)	THVB022

PLAN

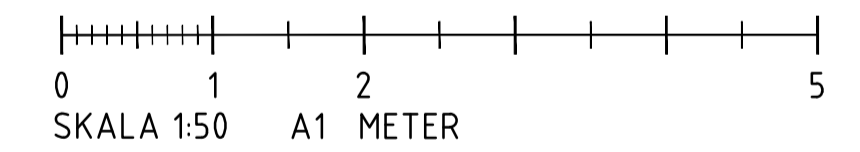


ELEVATION (C-C)



ANMÄRKNING

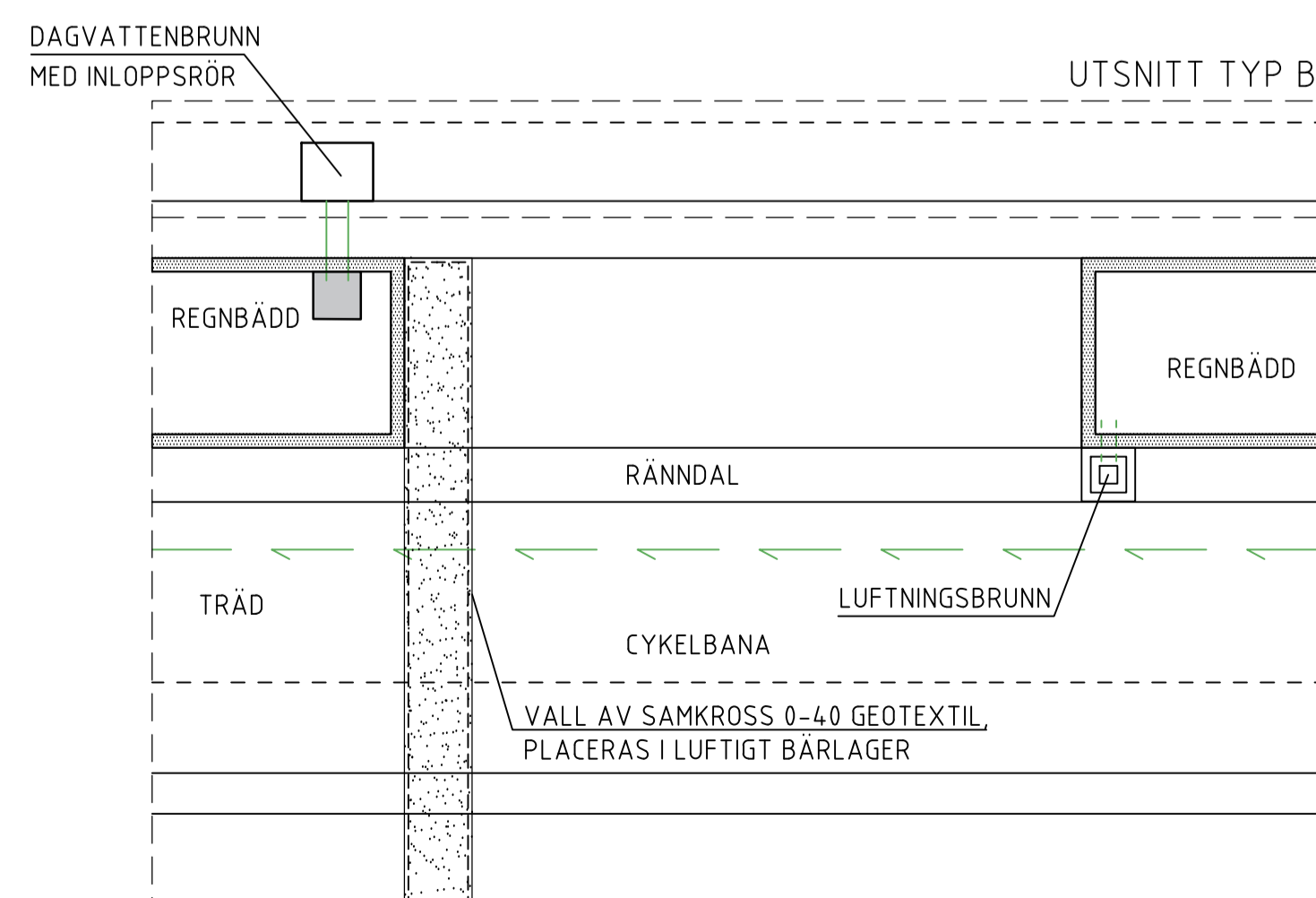
DENNA TYPRITNING VISAR ETT SYSTEM FÖR FÖRDRÖJNING OCH RENING AV DAGVATTEN. DIMENSIONERING OCH KONSTRUKTION AV TRÄDGRÖPSFUNDAMENT SKA BERÄKNAS OCH UTFÖRAS UTEFTER RÅDANDE FÖRUTSÄTTNINGAR I RESPEKTIVE PROJEKT.



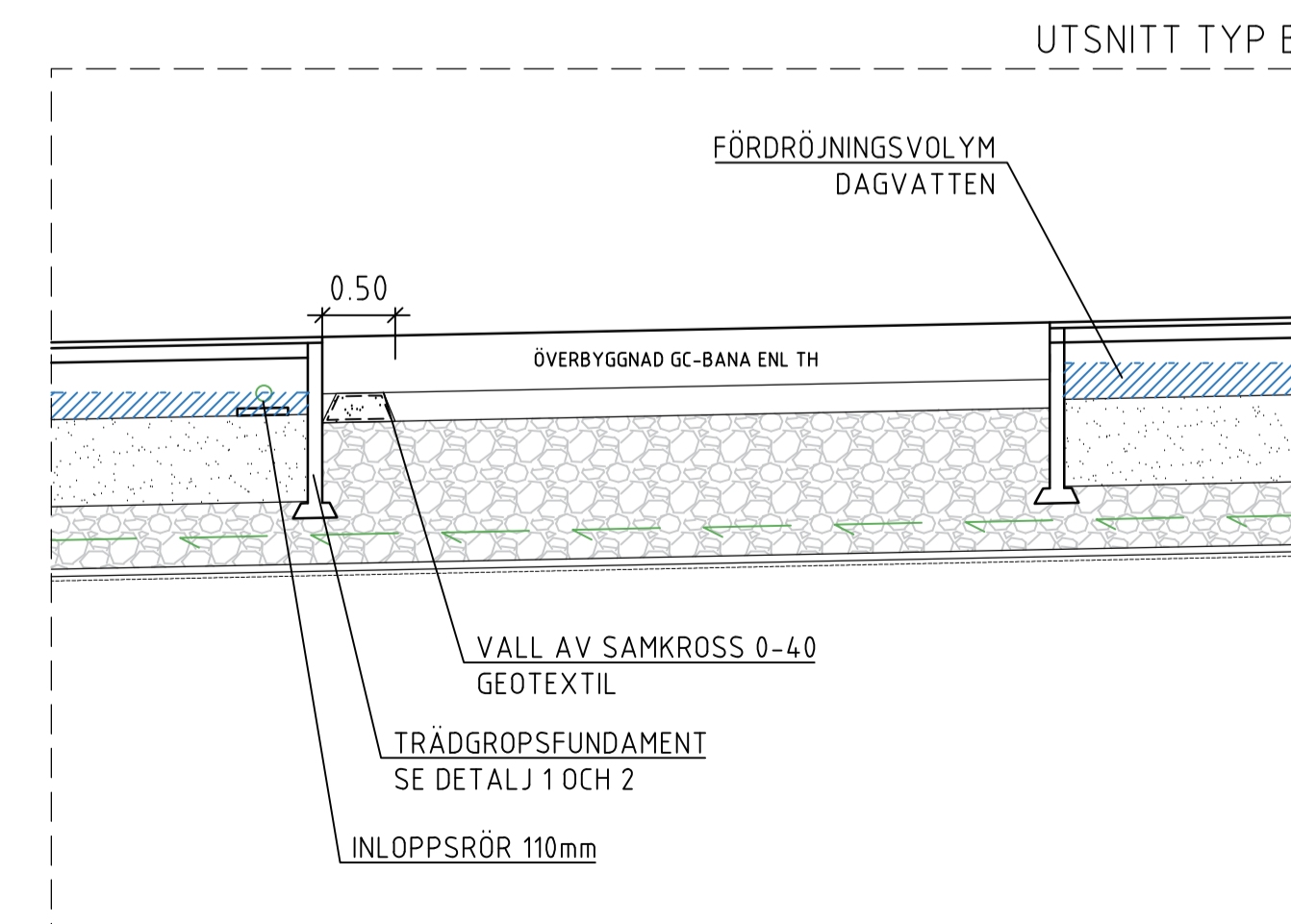
2019-10-21

PLAN TYP B

TYP B ANVÄNDS VID LÅNGLUTNING ÖVER 2%

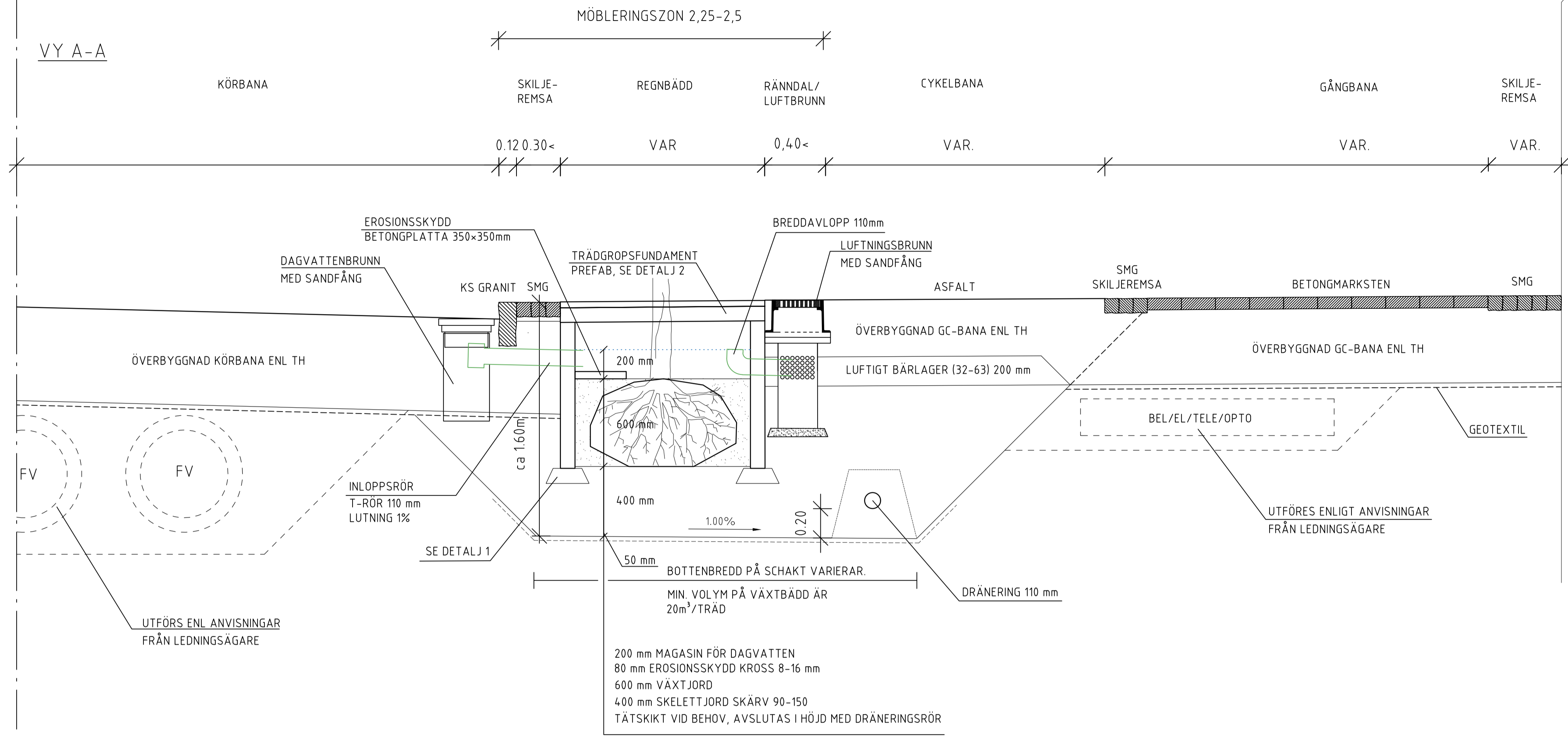


ELEVATION (C-C) TYP B

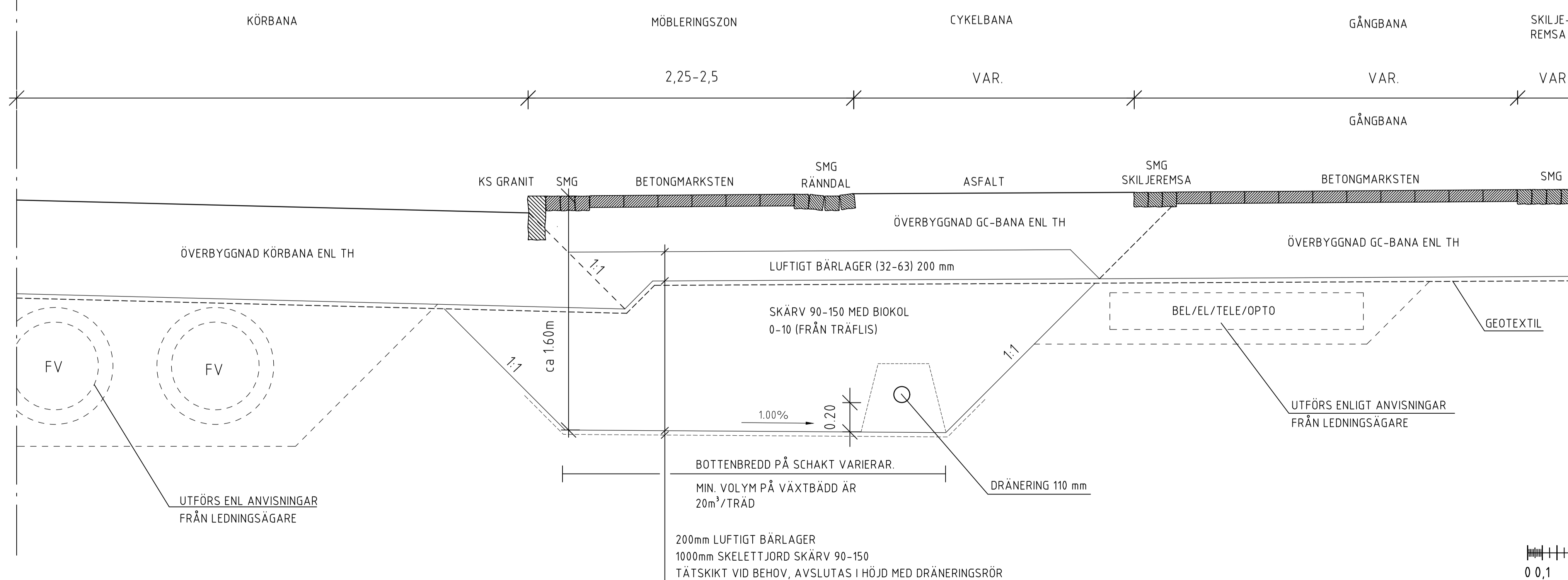


BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN
UPPDRAG NR	RITAD/KONSTR AV T GRÖNWALD			
DATUM	2019-XX-XX			
	GRANSK X.XX			
TYPRITNING T10 REGNBÄDD TYP A & B PLAN/ELEVATION - RITNING 1 (2) BILAGA TILL TEKNISK HANDBOK				
SKALA (A1)	NUMMER			BET
1:50				

VY A-A



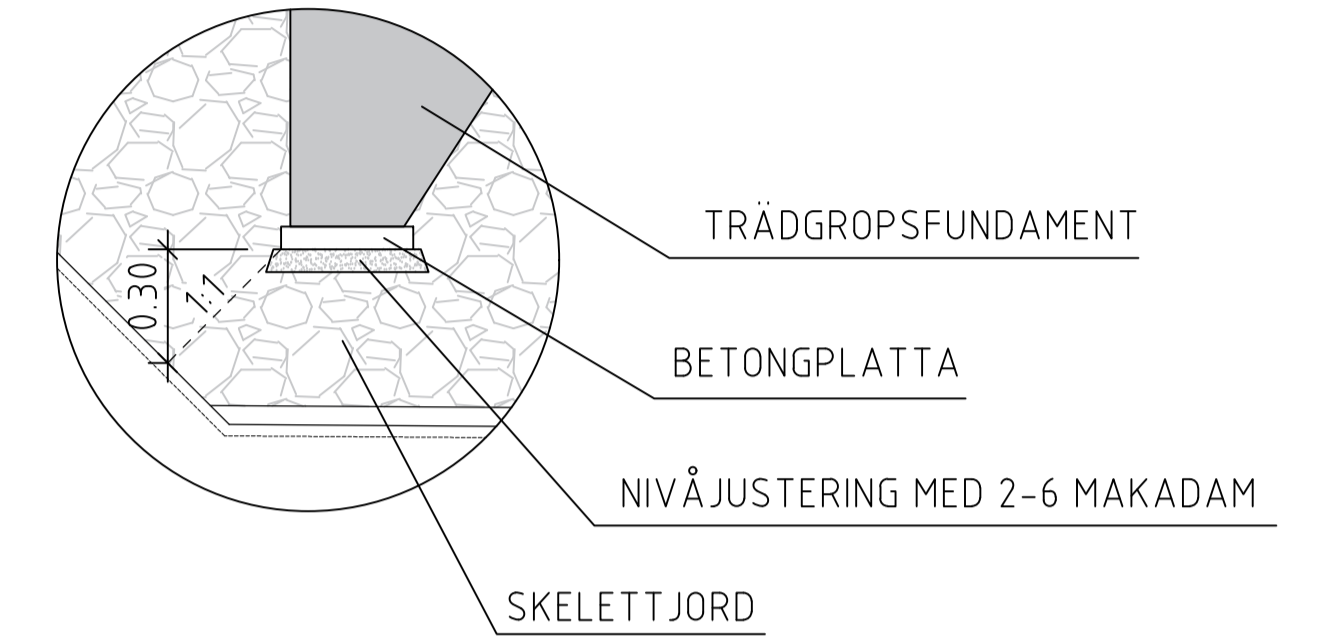
SEKTION B-B



HÄNVISNING

SMÅGATSTEN, GRANITKANSTÖD OCH ÖVERBYGGNADER UTFÖRS ENLIT TEKNISK HANDBOK

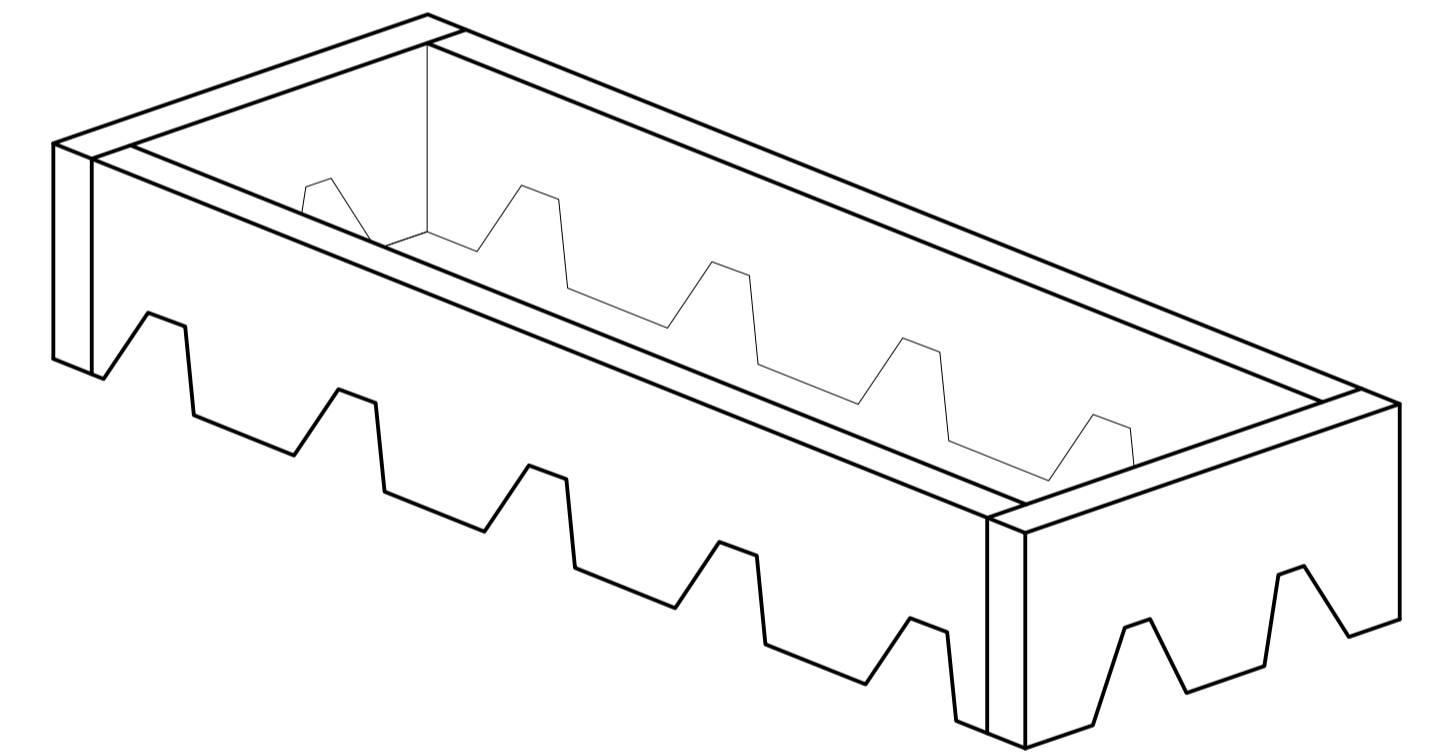
DETALJ 1



DETALJ 2

Principdetalj Trädgropsfundament i betong på vilken markgaller med ram placeras.

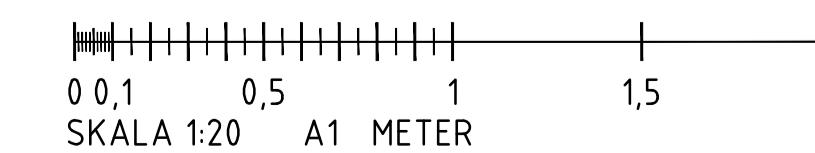
OBS ej skalenlig.



ANMÄRKNING

DENNA TYPRITNING VISAR ETT SYSTEM FÖR FÖRDRÖJNING OCH RENING AV DAGVATTEN. DIMENSIONERING OCH KONSTRUKTION AV TRÄDGROPSFUNDAMENT SKA BERÄKNAS OCH UTFÖRAS UTEFTER RÅDANDE FÖRUTSÄTTNINGAR I RESPEKTIVE PROJEKT.

2019-10-21



BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN
UPPDRAG NR	RITAD/KONSTR AV T GRÖNWALD			
DATUM	2019-XX-XX			
TYPRITNING T10 REGBÄDD TYP A & B PLAN/ELEVATION - RITNING 2 (2) BILAGA TILL TEKNISK HANDBOK				
SKALA (A1)	NUMMER	BET		
1:20				