

Byer i Vandbalance notat 4

Geologisk variation og LAR

Indhold

Forord.....	3
DEL 1: KORTLÆGNING AF GEOLOGISK VARIATION FOR OPTIMAL LAR-PLACERING.....	4
Indledning	4
Udgravning	6
Boring	6
Spydkatering.....	7
Geoelektriske metoder.....	7
Nye perspektiver på håndtering af regnafstrømning	8
DEL 2: METODER TIL VURDERING AF HYDRAULISK KAPACITET I MORÆNELER	9
Indledning	9
Mættet hydraulisk ledningsevne.....	9
Tre metoder til måling af hydraulisk ledningsevne i jord	10
Guelph-permeameter	10
Dobbeltring-infiltrrometer	10
Nedsivningshul	11
Overvejelser omkring valg af metode efter LAR-anlægstype	11
Eksempel på måling	12
DEL 3: Terræn- og pindsvinefaskiner for optimal udsivning i moræneler	13
Terrænfaskine (dyb grusrende).....	13
Pindsvinefaskine	17
Referencer.....	19

Forord

Dette notat består af tre dele udarbejdet i regi af innovationskonsortiet Byer i Vandbalances aktiviteter fra 2011 til 2014:

1. Kortlægning af geologisk variation for optimal LAR-placering.
2. Metoder til vurdering af hydraulisk kapacitet i moræneler.
3. Terræn- og pindsvinefaskiner for optimal udsivning i moræneler.

I forbindelse med innovationskonsortiet Byer i Vandbalance er der udgivet følgende notater:

Notat 1: Transport af vand på veje

Notat 2: Dobbeltporøst filter i København og Århus – anlæg og instrumentering

Notat 3: Anlæg af vejbede – erfaringer fra vejbede i Brøndby og København

Notat 4: Geologisk variation og LAR

Notat 5: Vurdering af regnafstrømningens kvalitet før og efter rensning

Notat 6: Renseeffektivitet af filterjord – danske erfaringer

Notat 7: Rensning af regnafstrømning med dobbeltporøs filtrering

Notat 8: Beplantning og drift af vejbede

Notat 9: Stormwater infiltration in Beder

Notat 10: Erfaringsopsamling på LAR-projekter udviklet under Byer i Vandbalance 2011-2014

Byer i Vandbalances ledelsesgruppe består af:

Ulrik Hindsberger, Teknologisk Institut

Ida Marie Knudsen, Teknologisk Institut

Marina Bergen Jensen, KU-Science

Peter Engelund Holm, KU-Science

Deltagende parter i Byer i Vandbalance:

HOFOR

Aarhus Vand

Vandcenter Syd

Spildevandscenter Avedøre

Københavns Kommune

Århus Kommune

Odense Kommune

Per Aarsleff A/S

Wavin

Orbicon

Københavns Universitet (KU)

Danmarks Tekniske Universitet (DTU)

Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelser (GEUS)

Teknologisk Institut (TI)

DHI

Notatet er udarbejdet af Britta Bockhorn, Marina Bergen Jensen, Københavns Universitet og Knud Erik Klint, GEUS.

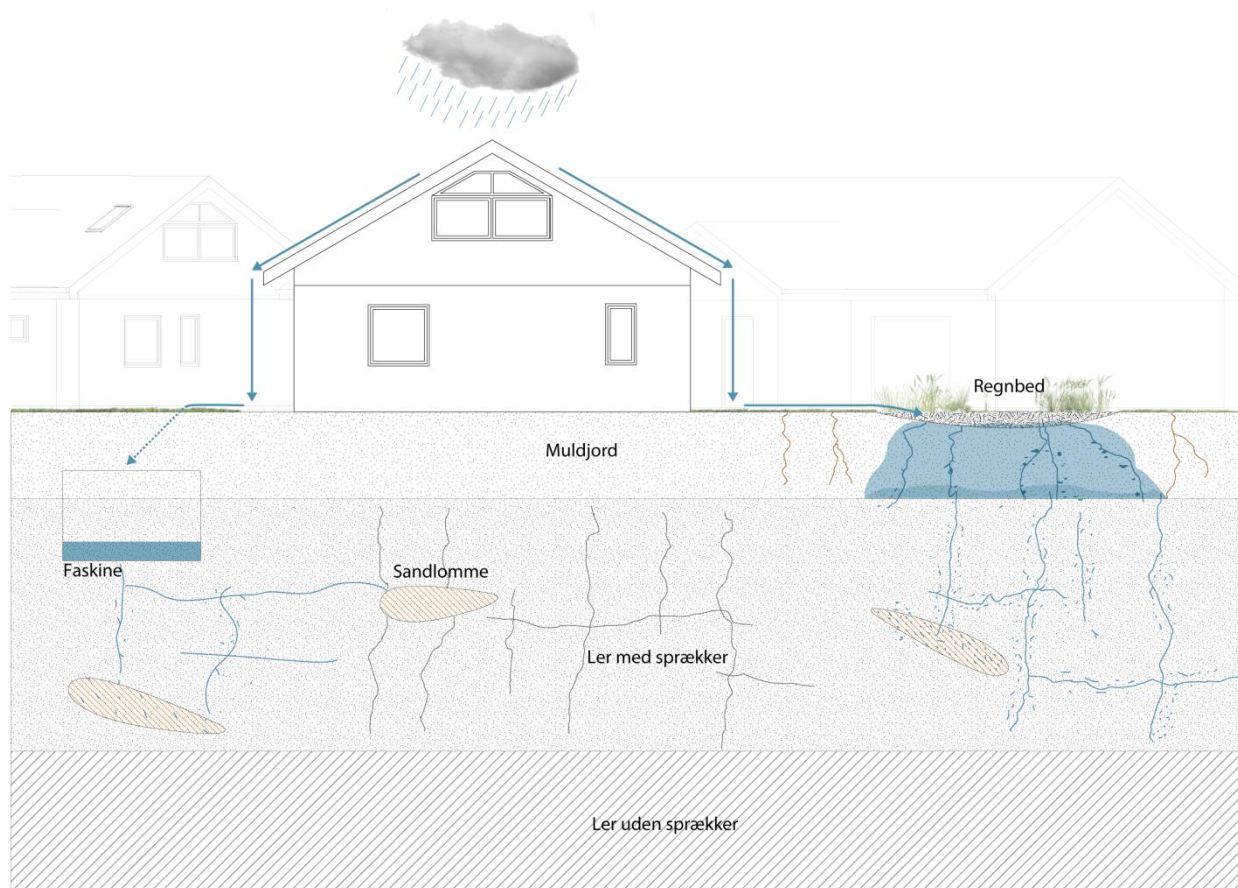
Maj 2015

DEL 1: KORTLÆGNING AF GEOLOGISK VARIATION FOR OPTIMAL LAR-PLACERING

Indledning

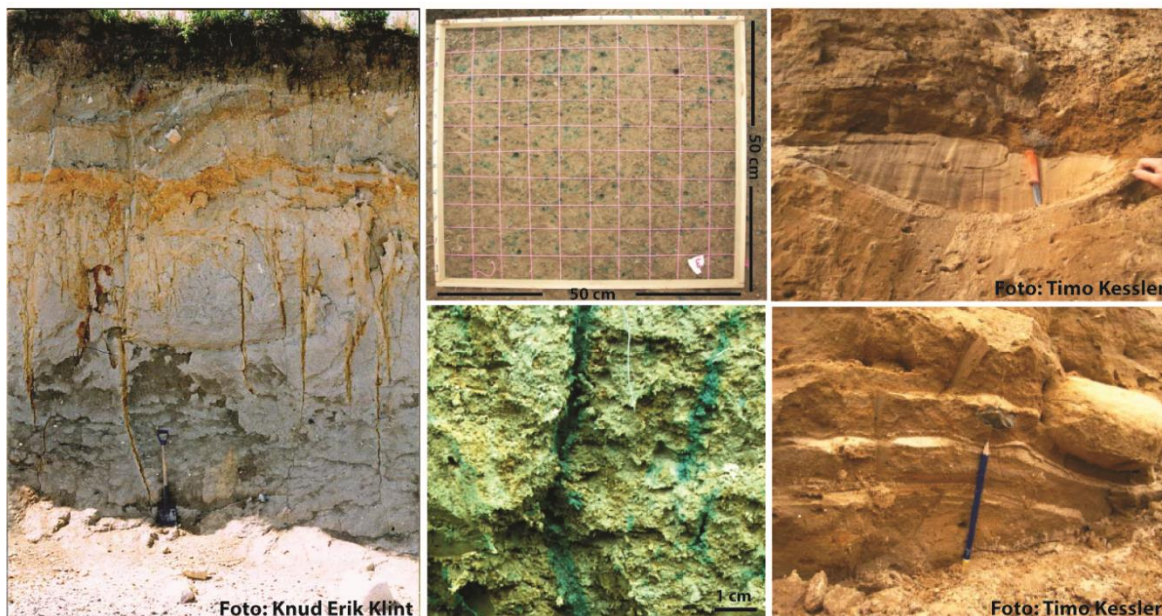
Lokal afledning af Regnvand (LAR) kan bidrage til at udvikle klimarobuste og bæredygtige byer og over hele Danmark afprøves LAR nu som et alternativ til udvidelse af kloaknettet. En særlig dansk udfordring områder karakteriseret af moræneler der dækker ca. 40% af Danmark dvs. store dele af Jylland, samt det meste af Fyn og Sjælland med omkringliggende øer. Inden for korte afstande varierer jordens hydrauliske ledningsevne betydeligt og det gør placering og dimensionering af nedsivningsanlæg som for eksempel regnbede og faskiner vanskelig. Med en god kortlægning af den lokale geologi kan nedsivningsanlæg placeres optimalt på grunden.

Moræneler er lavpermeabelt men ofte gennemsat af sprækker, sandlinser og ormegange. De tættest befolkede områder i Danmark ligger øst for isens hovedopholdslinje og er dermed opført på især moræneler, der i udgangspunktet er lavpermeabelt og derfor kun tillader vand at infiltrere langsomt ned i jordbunden. Moræneler er imidlertid en stærkt heterogen sedimenttype, hvor gletsjere under deres fremmarch har blandet underliggende sedimenter til den stærkt heterogene jordart vi kender som moræneler, og hvor efterfølgende jordbundsdannende processer har forøget heterogeniteten yderligere ved dannelse af makroporer. Makroporer kan dels være i form af mere eller mindre dybtgående sprækker dannet ved isens belastning af underlaget og efterfølgende fryse/tø og udtørningsprocesser, eller i form af bioporer, som ormegange og rodkanaler. Det betyder alt i alt, at nedsivningsraterne i morænejord kan variere adskillige størrelsesordener inden for et begrænset område som f.eks. en villahave. Den eksisterende geologiske kortlægning af Danmark er baseret på et 100 x 100 m til 200 x 200 m grid, der derfor ikke fanger LAR-relevant variation (Figur 1).



Figur 1: Illustration af geologisk variation i by opført på moræne. På grund af sandlinser og makroporer kan et LAR-element, som f.eks. et regnbed eller en faskine fungere vidt forskelligt afhængigt af om elementet tilfældigvis har hydraulisk kontakt til ensådan struktur eller ej. Hvis der opnås kontakt vil infiltrationskapaciteten med stor sandsynlighed være betydeligt større end hvis dette ikke er tilfældet. Illustration: Asbjørn Jessen efter ide fra forfatterne.

Sandlinser og makroporer fungerer som højhastighedsstrømningsveje. De kan dermed sikre at det infiltrerende vand får kontakt til et større jordvolumen. For at vandet kan forsvinde fra disse højhastighedsstrømningsveje, skal der være umættede forhold i jordmatrixen udenom. Makroporer har ofte en typisk fordeling i de øvre jordlag ned til ca. 3 meter under terræn, imens sandlommer forekommer mere tilfældigt. I Figur 2 ses fotos af sprækker, ormegange, rodkanaler og sandlommer/linser.



Figur 2: Fotos af makroporer og sandlomme/linser. Til venstre: sprækker i en blottet moræne-væg. Her ses den mørke topjord med humus og vegetation, derunder et gulligt lag bestående af veldrænet moræne, og herunder – adskilt af et vandret rødt lag - ses den grå, reducerede (iltfrie) moræne. Fra det røde lag, ses lodretgående sprækker, der alt sammen er farvet rødt på grund af indhold af jern-oxid-hydroxider ("rust"), som netop kun kan opstå fordi iltholdigt vand trækkes med ned via sprækkerne. Tektoniske sprækker gennemskærer hele profilet, mens frost-tø og udtørnings-sprækker primært ses i de øverste jordlag (til ca. 2 m dybde). Midterstriben: biopor. Øverst ormegange, nederst rodkanaler. Ormegangene ses på en vandret flade på 1 x 1 m blottet i en dybde af 0,5 m dybde efter at et blå farvestof forinden er vandet ud på jordoverfladen. Her er der ca. 1100 ormegange/m². Rodkanalerne er blottet på en lodret væg, 0,5 m under terræn, igen efter udvanding af blå farvestof på jordoverfladen. Til højre: To eksempler på sandlinser blottet i en moræne, ca. 4,5 m under terræn, med størrelsesforhold markeret med hånd, kniv og blyant. Makro-strukturer som disse i en ellers lavpermeabel matrice kan bidrage til at øge vandets infiltrationshastighed markant.

Der findes forskellige metoder til at kortlægge geologisk variation på, men det er ikke alle, der er velegnede til den forholdsvis lille skala, der ofte vil være tale om i forbindelse med LAR. I det følgende præsenteres metoder, der kan afsløre geologiske makrostrukturer i moræneområder, og på den måde understøtte placering af LAR-nedsivningselementer. De tre første metoder er invasive, hvilket vil sige at der graves fysisk i jorden, mens den sidste metode er baseret på elektriske signaler og dermed ikke-invasiv. Det bemærkes, at LAR-elementer baseret på nedsivning altid skal anlægges på veldrænet jord.

Udgravning

Ved en geologisk udgravning udføres en mindst 4 m lang, 1 m bred og 2 m dyb udgravning, eller en eksisterende udgravning kan undersøges. En udgravning giver mulighed for at foretage en meget detaljeret geologisk beskrivelse. Her kan strukturer på centimeterskala beskrives kvantitativ og kvalitativt. Udgravningens orientering og dybde er fleksibel og betyder at de fleste strukturer kan registreres i deres fulde form og størrelse. Små udgravninger er generelt billige (< 5.000 kr), men tidskrævende at opmåle og kan typisk kun gennemføres i byområder, hvis der er tale om åbne områder eller i forbindelse med igangværende anlægsopgaver.

Boring

En boring kan være mange meter dyb og udføres normalt som snegleboring eller kerneboring, hvor analyse af boreprøver kan afsløre jordlagenes sammensætning og rumlige fordeling i undergrunden. Ved at interpolere mellem flere borehuller kan man vurdere hvordan den horisontale fordeling af sediment

er i området. Sandlinser kan fanges, men især vertikale makroporer kan normalt ikke ses. I Danmark registreres alle resultater fra borehuller i en fælles database, JUPITER (<http://data.geus.dk/geusmap/?mapname=jupiter>), der er frit tilgængelig via nettet. En boring kræver myndighedstilladelse, og må kun udføres hvis risiko for forurening af grundvandet kan udelukkes, eller hvis der i området er ingen eller kun begrænsede drikkevandsinteresser. Borehuller er generelt dyre (1000 kr pr m), men er en mindre invasiv metode end en udgravning. Ofte vil borer være den eneste mulighed for at få geologiske/hydrauliske informationer i byområder.

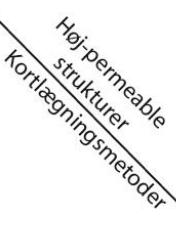
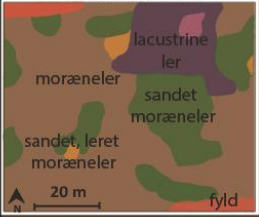







Spydkatering

Spydkatering er en minimal invasiv fremgangsmåde, som har været brugt til systematisk kortlægning af overfladenære sedimenter de sidste ca. 125 år i Danmark. Med metoden presses et ca. 1 cm tykt stål-spyd med en indfræset rille ca. 1 m ned i jorden. Når spyddet trækkes op følger en prøve af sedimentet med i rillen, der herefter kan analyseres. Denne metode er velegnet til by-forhold. Typisk presses spyddet ned i jorden manuelt, om end der i dag også findes små køretøjer (ATV), der med specialaggregat kan udtage prøven. Hvis der er tale om ikke komprimeret og ikke udtørret jord kan 2 personer spydkartere et 100 x 100 m areal i et 5 m grid i løbet af en dag, inklusive den tilhørende geologiske analyse.

Geoelektriske metoder

Geoelektriske metoder omfatter elektriske (GeoEL, MEP), elektromagnetiske (Dual EM, TEM/SkyTEM, georadar) og seismiske. Seismiske metoder kan let anvendes i byområder, men kræver plads og ro og optages derfor typisk om natten når der er minimal trafik. Geoelektriske og magnetiske metoder forstyrres let af metal eller ledninger i jorden, og kan derfor primært anvendes i grønne områder i byen. De forskellige metoder og deres evne til at afsløre makrostrukturer er vist i Figur 3.

De forskellige metoder og deres evne til at afsløre makrostrukturer er vist i Figur 3.

	Heterogenitet af sedimenter 	Heterogenitet af sandlinser 	Heterogenitet af sprækker 	Heterogenitet regnorme- og rodhuller 
Udgravninger 	ikke anvendelig	Identifikation af fuld størrelse og form er mulig	Identifikation af hyppighed, størrelse og orientering er mulig	Identifikation af hyppighed, størrelse og orientering er mulig
Borehuller 	ikke anvendelig	Tilstedeværelse kan afsløres men ingen oplysninger om størrelse eller form	Tilstedeværelse kan afsløres men ingen oplysninger om orientering og frekvens	Tilstedeværelse kan afsløres men ingen oplysninger om orientering og frekvens
Spyd katering 	Identifikation af sedimenter nær overfladen muligt gennem kortlægning i et finmasket net.	ikke anvendelig	ikke anvendelig	ikke anvendelig
Geoelektriske metoder (MEP) 	Identifikation af sedimenter nær overfladen og sedimenter på større dybde muligt med lille elektrode afstand (1m)	Tilstedeværelse kan afsløres men ingen klare oplysninger om størrelse eller form	Tilstedeværelse kan afsløres men ingen oplysninger om orientering og frekvens	ikke anvendelig

Figur 3: Oversigt over forskellige geologiske kortlægningsmetoder, der i større eller mindre grad kan afsløre makrostrukturer af betydning for placering og dimensionering af LAR-nedsivningselementer. Grøn: Metoden er anvendelig til at afsløre den anførte makrostruktur. Gul: metoden kan afsløre forekomst af anført makrostruktur, men ikke beskrive strukturen yderligere. Rød: metoden er ikke-anvendelig i den givne kombination.

Nye perspektiver på håndtering af regnafstrømning

Områder, der er gennemsat af sprækker eller har mange sandlinser, har højere permeabilitet og dermed større dræncapacitet sammenlignet med deres omgivelser. Med de her beskrevne metoder kan disse områder identificeres, og LAR-anlægget kan placeres og designes optimalt. Med optimal placering kan størrelsen og dermed omkostningerne minimeres.

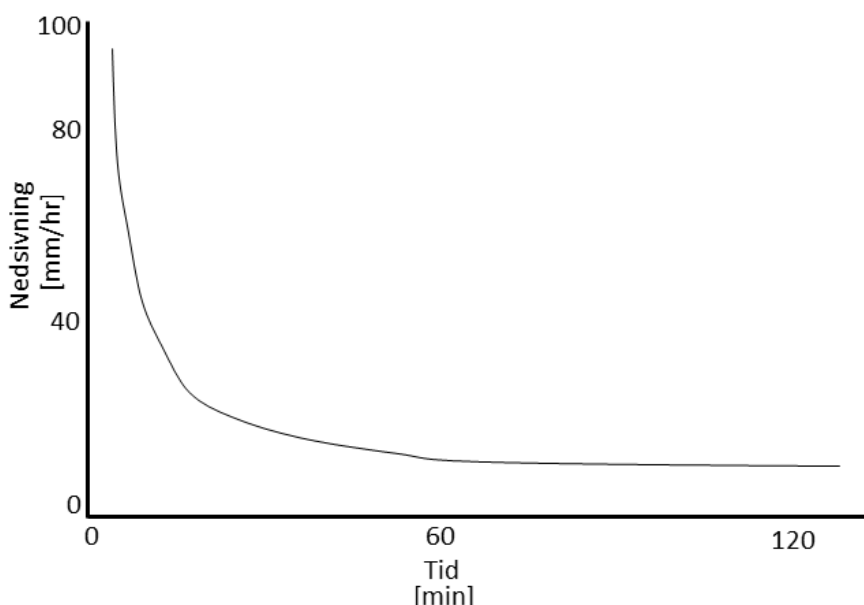
DEL 2: METODER TIL VURDERING AF HYDRAULISK KAPACITET I MORÆNELER

Indledning

Ved dimensionering af LAR-anlæg beregnet til nedsivning af regnafstrømning, som eksempelvis et regnbed, en nedsivningsplæne eller en faskine, har man brug for et mål for jordens hydrauliske ledningsevne, dvs. jordens evne til at modtage vandet. Ellers kan anlægget ikke dimensioneres korrekt. Det er sværest at vurdere ledningsevnen i jord udviklet på leret moræne, fordi den geologiske variation er stor inden for korte afstande, og fordi den hydrauliske ledningsevne generelt er lav. Korrekt måling er derfor mere kritisk end hvis der er tale om sandjord. Der findes flere metoder til at måle jordens hydrauliske ledningsevne, alle baseret på test med nedsivning af vand, men repræsenterende forskellige skalaer og dybder. Her gennemgås tre forskellige metoder til vurdering af jordens nedsivningsevne og metodens anvendelsesområde.

Mættet hydraulisk ledningsevne

Når vand siver ind i jord er der i starten tale om umættet strømning, hvor vandet suges ind i jorden på grund af jordens kapillarkræfter (jorden virker som en svamp, fordi de fine porer i jorden har hårrørsvirkning). Efterhånden som de små porer i jorden fyldes med vand og kapillarkræfterne dermed udlignes bliver strømmingen mættet, og drives alene af tyngdekraften, hvorefter det er jordens system af større porer, der bestemmer hvor hurtigt nedsivningen foregår. Så længe jorden er umættet opsuges vandet hurtigere end når der er tale om mættet strømning (Figur 4). Vand bundet af jordens kapillarkræfter kan kun forsvinde ved fordampning. LAR-anlæg dimensioneres efter mættet hydraulisk ledningsevne, fordi man ikke kan være sikre på at kapillarkræfterne er aktive når den dimensionsgivende regn, f.eks. 5-årsregnen, kommer. I praksis betyder det, at jordens evne til at opsuge vandet undervurderes, hvilket kan være en del af forklaringen på at LAR-nedsivningselementer ofte fremstår overdimensionerede. Hydrauliske ledningsevne betegnes K , og K_{sat} hvis der er tale om mættet hydraulisk ledningsevne (sat = saturated = mættet).



Figur 4: Illustration af et typisk forløb af infiltration over tid. I starten går det hurtigt og der opsuges meget vand fordi jorden er umættet. Mættet hydraulisk ledningsevne svarer til det vandrette stræk på kurven.

Vandtransport i mættet jord afhænger ikke kun af jordens porestruktur, men også af evt. vandtryk over jorden, såkaldt "head"; jo større head desto hurtigere presses vandet gennem jorden. Sammenhængen fremgår af Darcy's lov:

$$q = i * K_{sat},$$

der siger, at vandtransporten pr. tværsnitsareal, q (m^3/m^2 pr. s) er ligefrem proportionalt med mættet hydraulisk ledningsevne, K_{sat} (m/s), og gradienten, i , (m/m), der måles som højden af vandsøjlen divideret med afstanden fra infiltrationspunktet til det punkt der betragtes. Hvis der ikke er frit vand på overfladen er gradienten 1 og vandtransporten dermed lig den hydrauliske ledningsevne. Ved måling af mættet hydraulisk ledningsevne bygges altid en vandsøjle op over jorden, hvilket der skal korrigeres for i den efterfølgende beregning af jordens ledningsevne. Man kan enten fastholde en bestemt vandsøjlehøjde (constant head-metoden) mens målingen foretages, eller registrere hvor hurtigt vandsøjlen falder (falling head-metoden).

Generelt er jordens hydrauliske ledningsevne størst ved jordoverfladen, dels på grund af en mere løs struktur, dels på grund af større fordampning og dermed større bidrag til umættet strømning. LAR-anlæg bør derfor så vidt muligt placeres på jordoverfladen, eksempelvis i form af et regnbed, eller en nedsivningsplæne, eller overfladenært i form af en udsivningsrende, eller en "pindsvinefaskine".

Tre metoder til måling af hydraulisk ledningsevne i jord

Ved måling af mættet hydraulisk ledningsevne i jord under feltforhold er der følgende tre udfordringer:

- 1) Jorden skal vandmættes før målingen foretages, og uanset hvor grundigt dette gøres vil der altid være en randeffekt
- 2) Den geologiske variation skal indfanges, ikke mindst eventuelle makrostrukturer i leret moræne
- 3) Det skal være praktisk muligt. Her er det især mængden af vand, der skal transporteres til stedet, og den tid det tager før der er stabile målinger, der er udfordringen.

Her beskrives tre metoder til bestemmelse af mættet, hydraulisk ledningsevne (Figur 4).

Guelph-permeameter

Et Guelph-permeameter består af en ca. 5 cm bred, hul cylinder, der stikkes ned i den jorddybde (fra 15 til 75 cm) som målingen ønskes foretaget i, og som fyldes med vand. Der opretholdes et konstant vandspejl i cylinderen (constant head) ved hjælp af et indbygget Mariotte-flaske-princip. Fra cylinderens opsuges og spredes vandet i første omgang ud i jorden omkring cylinder-mundingen, men efter noget tid bliver jorden vandmættet og strømningens retning bliver primært rettet nedad i jordmatricen. Når der er opnået stabile forhold foretages målingen. Da udsivningsarealet er lille er det kun nødvendigt at bruge en lille vandmængde (ca. 2 liter vand), og mættet strømning opnås hurtigt. Til gengæld er det i heterogen jord nødvendigt at foretage mange målinger, fordi hver enkelt måling kun dækker et lille areal, hvor makrostrukturer ikke hver gang fanges. Guelph-permeameteret er udviklet i Canada.

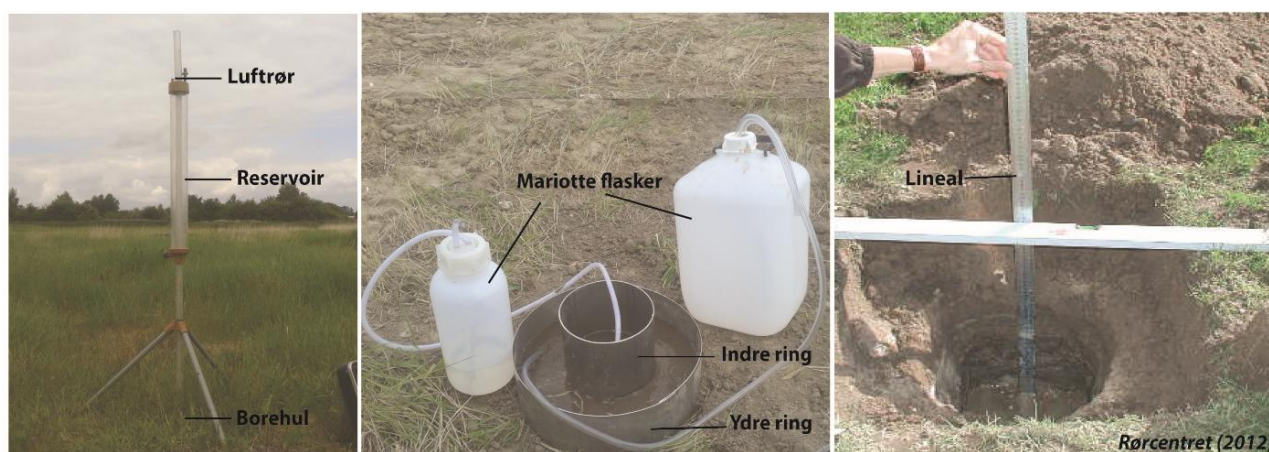
Dobbeltring-infiltrometer

Dobbeltring-infiltrometeret består af to tyndvæggede metalringe, nemlig en lille indre ring (f.eks. 15 cm i diameter, og 30 cm høj) og en større ydre ring, (f.eks. 40 cm i diameter, og 20 cm høj), der begge trykkes ca. 5 cm ned i jorden. Bagefter fyldes begge ringe med vand til samme niveau. Formålet med den ydre ring er, at etablere nedadrettet strømning fra den lille indre ring, og dermed minimere randeffekten. Ved hjælp af Mariotte-flasker opretholdes et konstant vandspejl (constant head) i begge ringe. Vanstandsændringer i den Mariotte-flaske, der forsyner den indre ring, registreres over tid, og når der er opnået stabile forhold foretages målingen. Mættet hydraulisk ledningsevne kan også bestemmes med falling-head metoden, hvor vandstanden falder i begge ringe, og hvor faldet i den indre ring registreres og benyttes til beregningen. Sammenlignet med constant-head metoden har falling head-metoden den fordel at den både kan bruges i jorde med lav hydraulisk ledningsevne og i jorde med høj hydrauliske ledningsevne, hvor vand hurtigere kan ifyldes manuelt end med Mariotte-flaskesystemet. Dobbeltring-infiltrometeret dækker et større areal og indfanger dermed bedre evt. makrostrukturer end Guelph-permeameteret. Til gengæld skal der bruges betydelige mængder vand, og det tager længere tid før målingen er stabil. Dobbeltring-infiltrometeret repræsenterer en traditionel, veletableret metode til at bestemme mættet hydraulisk ledningsevne direkte på eller tæt ved jordoverfladen. Hvis der skræbes

noget af jordoverfladen af, hvilket kan være relevant hvis LAR-anlægget skal placeres i en vis dybde, er det vigtigt at undgå udtværing (smearing) og dermed tilstopning af evt. makrostrukturer (jordoverfladen skal renses ved at brække jordklumperne af i en vandret bevægelse med f.eks. en lommekniv eller en murerske, sådan at regnormegange og sprækker kommer frem).

Nedsivningshul

Nedsivningstest via et lille gravet hul i jordoverfladen er i Danmark en almindelig brugt metode til at måle mættet hydraulisk ledningsevne for dimensionering af LAR-anlæg. Der graves et 25 cm x 25 cm firkantet hul med en dybde på 30 – 50 cm (eller den dybde målingen ønskes foretaget i, dog mindst 20 cm dybt for at målingen kan foretages). Hullet fyldes med vand og holdes fyldt den første halve time. Herefter måles hvor meget vandet synker på 10 min, og der fyldes igen vand i til jordoverfladen. Hvis synkehastigheden er ens ved to på hinanden følgende målinger antages jorden at være vandmættet, og der foretages den endelige måling ved igen at registrere afstanden fra jordoverfladen til vandspejlet efter 10 min. Nedsivningshullet minder om dobbeltring-infiltrometeret med hensyn til tid og vandforbrug. Fordelen er at metoden ikke kræver special-udstyr. Randeffecten vil være større (større grad af umættet strømning) end hvis der benyttes en dobbeltring. Som for dobbeltring-infiltrometeret er det vigtigt at undgå smearing af den jordoverflade målingen foretages over.



Figur 4: Metoder til måling af mættet hydraulisk ledningsevne i jord. Alle velegnet til LAR. Fra venstre mod højre: Guelph-permeameter, Dobbelttring-infiltrometer (constant head metode) og Nedsivningshul. Målearealet, og dermed den geologiske heterogenitet som hver metode tager hensyn til, stiger fra venstre mod højre. Til gengæld går målingerne hurtigere fra højre mod venstre. Der er også forskel på i hvilken dybde målingen foretages, se nedenfor.

Overvejelser omkring valg af metode efter LAR-anlægstype

LAR-nedsivningsanlæg bør placeres det sted på arealet, hvor den mættede hydrauliske ledningsevne er størst. For at indfange hydraulisk variation på arealet skal der foretages flere målinger, især hvis der benyttes et Guelph-permeameter, der kun måler over et lille areal. Man bør principielt foretage målinger forskellige steder på arealet indtil gennemsnittet af målingerne ikke ændrer sig betydeligt ved yderligere målinger.

Jordens hydrauliske ledningsevne bør måles i den dybde, hvor udsivningen fra LAR-anlægget skal finde sted. Guelph-permeameteret kan let stikkes ned til den relevante dybde, mens Dobbelttring-infiltrometeret og Nedsivningshullet kræver at jorden fjernes til større dybde, hvis et mere præcist mål for eksempelvis en faskines forventede kapacitet skal opnås.

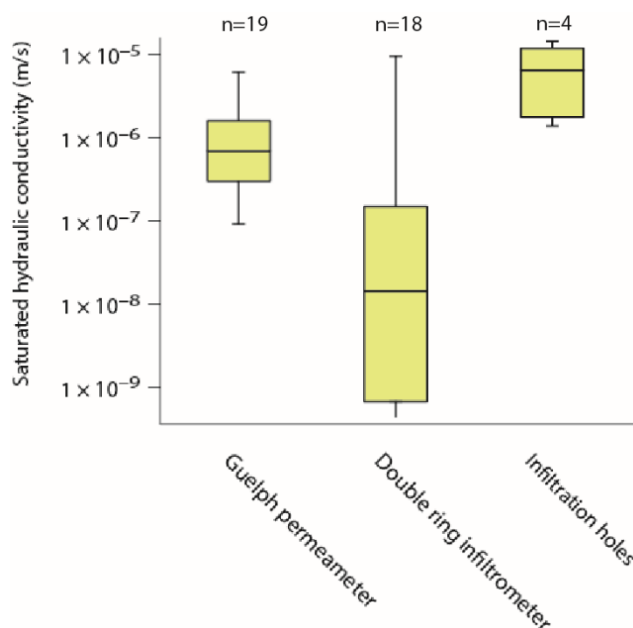
I tabel 1 nedenfor er de tre metoder og deres anvendelsesområder vist samlet. Tabellen indeholder også henvisninger til manualer for de tre metoder.

Tabel 1: Overblik over tre metoder til måling af jords evne til at optage vand, alle velegnet til brug ved placering og dimensionering af LAR-nedsivningselementer. For alle tre metoder gælder at det er den mættede, hydrauliske ledningsevne, dvs. den nedadrettede vandstrømning, når den omkringliggende jord er vandmættet, der forsøges estimeret.

	Guelph-permeameter	Dobbeltring-infiltrometer	Nedsivningshul
Hvor måles?	Målinger foretages til en dybde af 15-75 cm hvor nedsivningshastigheden er generelt lavere end direkte på overfladen	Målinger foretages typisk tæt på jordoverfladen, som er hydraulisk mest aktiv, men kan også foretages i større dybde	Målinger foretages til en dybde af 20 - 50 cm hvor nedsivningshastigheden er generelt lavere end på overfladen
Retningen af vand flow	3-dimensionelt	1-dimensionelt	3-dimensionelt
Effekt på jordstrukturen	Smearing af borehullet forårsaget af boringen af hullet --> Hydrauliske nedsivningsevne kan blive underestimeret Modforanstaltning: forsigtig fjernelse af smearing med knivret	Dannelse af sprækker mens indførselen af ringerne som præferentielle flow-ruter --> overestimering af hydrauliske nedsivningsevne Modforanstaltning: tætning af sprækker med ler på yderste side af indre ring	Smearing forårsaget af gravningen af hullet --> Hydrauliske nedsivningsevne kan blive underestimeret Modforanstaltning: forsigtig fjernelse af smearing med knivret og brug af teknologier som for hindre smearing ved gravningen, f.esk. kæddegraver
Graden af forstyrrelsen	Minimalt invasiv	Ikke invasiv	Højt invasiv
Egenethed til at repræsentere geologiske heterogenitet	Dårlig	Hellere dårlig	God
Metodevejledning	http://stormwaterbook.safl.umn.edu/content/infiltration eller https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/guelph-constant-head-permeameter.html	http://stormwaterbook.safl.umn.edu/content/infiltration (falling head metode) https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/double-ring-infiltrometer.html (constant head metode)	http://www.laridanmark.dk/dimensionering-af-lar-anlaeg/31582

Eksempel på måling

Jordens hydrauliske ledningsevne er vanskelig at bestemme, og som beskrevet ovenfor har de forskellige metoder fordele og ulemper. I Figur 5 er den samme jord målt med de tre metoder gennemgået ovenfor. Guelph-permeameteret og Dobbelringsinfiltrometeret returnerer værdier der i gennemsnit er betydeligt lavere en værdierne opnået med Nedsivningshullet. Dette skyldes sandsynligvis at Nedsivningshullet nedsiver over det største areal og dermed bedst indfanger makroporer. Der kan desuden være en større randeffekt.



Figur 5: Mættet hydraulisk ledningsevne for jord udviklet på leret moræne bestemt med tre forskellige metoder. Der er foretaget henholdsvis 19, 18 og 4 målinger med hver metode. Boksene viser 25 %, 50 % og 75 % fraktilerne. Barrerne viser minimums- og maksimumsværdier. Kilde: Bockhorn et al., 2014.

DEL 3: Terræn- og pindsvinefaskiner for optimal udsivning i moræneler

I Østdanmark, øst for isens hovedopholdslinje under sidste istid, er nedsivningsforholdene ofte dårlige på grund af stort lerindhold i jorden, men disse områder er samtidig præget af stor heterogenitet. Inden for korte afstande varierer jordens hydrauliske ledningsevne derfor betydeligt og det gør placering og dimensionering af nedsivningsanlæg vanskelig. Her foreslås to design der øger sandsynligheden for optimal udsivning.

De mest almindelige højhastigheds-flowveje i lavpermeabelt moræneler er makroporer og sandlinse, som begge har potentiale til at øge infiltrationen i en ellers meget vanskeligt drænet jord. Som beskrevet i del 1 af dette notat, kan en detaljeret geologisk kortlægning hjælpe med at udpege den bedste placering for nedsivningsanlæg. En alternativ strategi er at designe anlægget så chancen for at krydse høj-permeable jordstukturer øges, og sådan at kontaktarealet til omkringliggende jord, også i den øvre, typisk umættede zone, optimeres.

Terrænfaskine (dyb grusrende)

En simpel grusfyldt rende, der løber som en smal forholdsvis dyb rille i landskabet, vurderes at være det simpleste LAR-element for nedsivning i leret moræne. Et sådan element kan betegnes en terrænfaskine, eller en grusrende. Fordelene er flere:

- Med en aflang geometri øges udsivningsarealet sammenlignet med en mere kubisk faskine
- Med placering i terræn opnås størst mulig effekt af faskinen, dels fordi topjorden har størst hydraulisk ledningsevne på grund af løs struktur takket være ormegange, rødder og anden biologisk aktivitet, dels har størst magasinkapacitet på grund af større porøsitet, hurtig udtørring og maksimal afstand til grundvandspejl.
- Med grus som fyldmateriale har faskinen bæreevne også i terræn, og kan overkøres med almindeligt udstyr. Med grus er det også let at grave på tværs, hvis andre arbejder kræver dette.
- En terrænfaskine kan anlægges i en arbejdsgang, hvis pladsforholdene tillader adgang for en traktor.
- Elementet er synligt, og det kan dermed let konstateres om det fungerer.

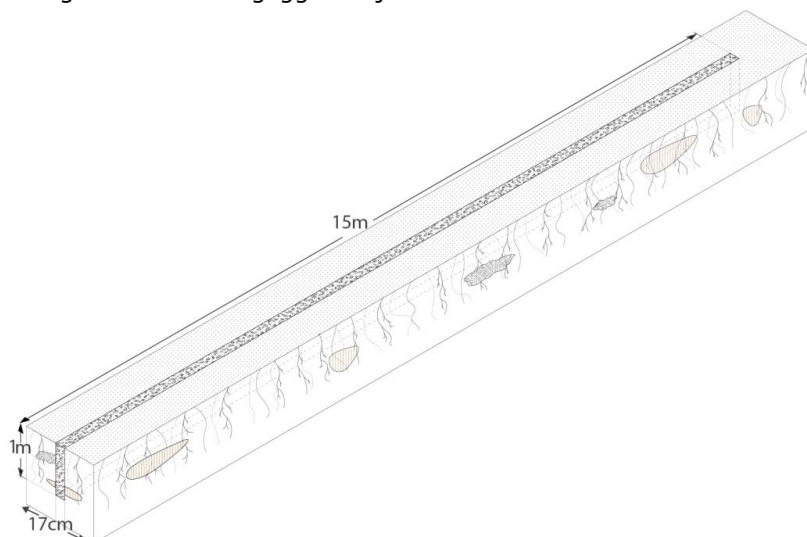
Udover adgangsforhold er en binding at grusrenden skal ligge nogenlunde vandret i terrænet, dvs. at renderne skal anlægges langs terrænkoterne, for fuld udnyttelse af kapacitet. Løsningen er derfor mest velegnet til fladt eller svagt ondulerende terræn.

I regi af Byer i Vandbalance etableredes tre sådanne terrænfaskiner i Mårslet ved Århus. Formålet var at teste betydning af geologisk kortlægning for placering af LAR-nedsivningselementer i moræne. Derfor blev de tre terrænfaskiner placeret i områder med markant forskellig sammensætning af morænen (ler, sandblandet ler, lerblandet sand), men efter præcis samme design. Placeringen af de tre terrænfaskiner er vist i Figur 1.



Figur 1: Geologiske kort over forsøgsområdet i Mårslet og placering af de tre terrænfaskiner. Området viser stor geologisk variation. Moræneler udgør den største del af området.

Hver grusrende bestod således af en 15 m lang, 1 m dyb og 0,17 m bred rende, fyldt med grus med diameter 16-32 mm, og hulrumsvolumen på ca. 25 % (Figur 2). Anlægsarbejdet blev udført med en kædegraver frontmonteret på en traktor. Med en bag-monteret tragt fyldtes renden med grus i samme arbejdsgang (Figur 3). Kædegraveren har den fordel at den ikke ødelægger aggregatstrukturen eller forårsager smearing af den omkringliggende jord.

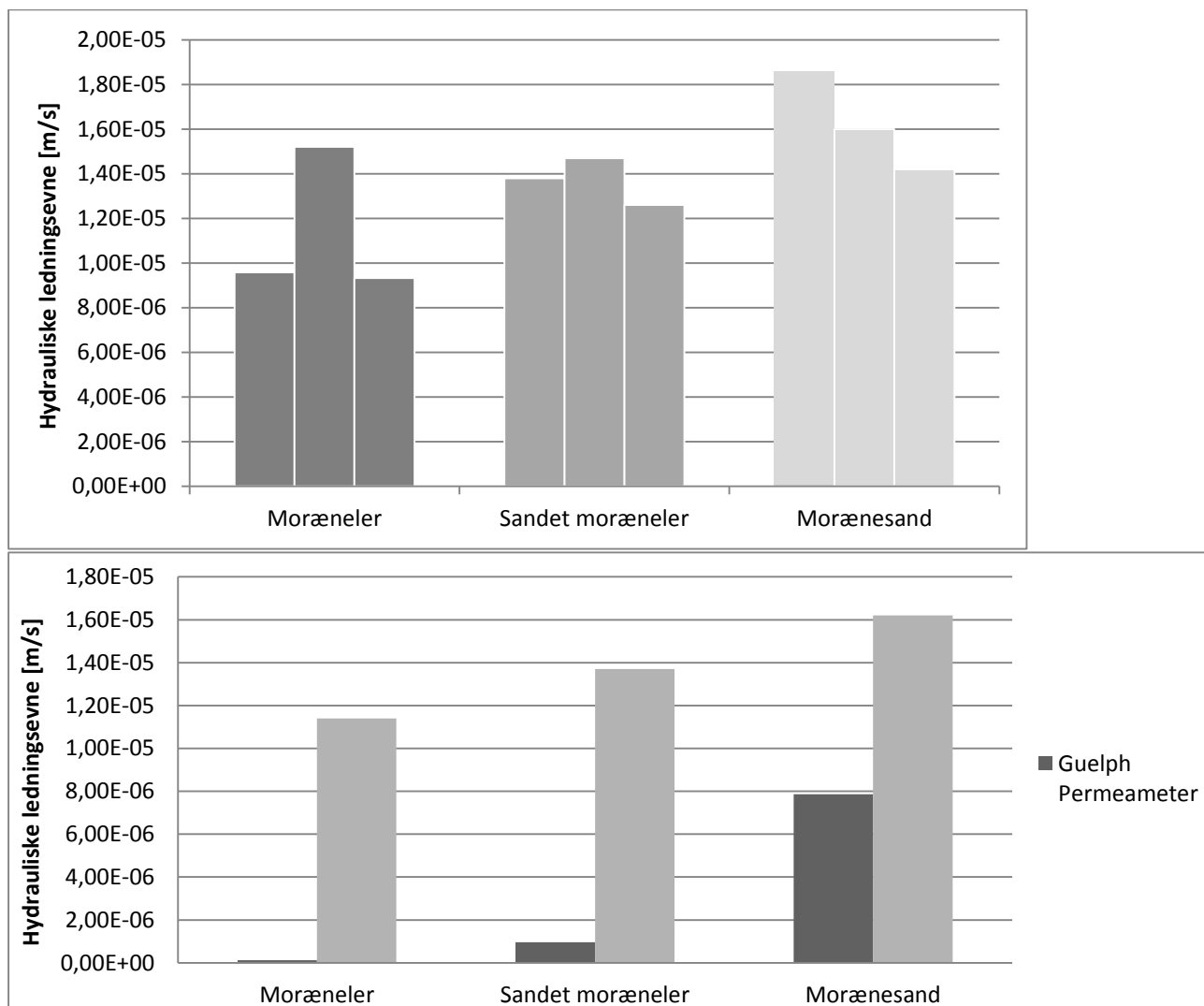


Figur 2: Skitse af terrænfaskine (dyb grusrende) i geologisk heterogen moræneler, med dimensioner som afprøvet i Mårslet. Med smal og aflang form øges chancen for at opnå kontakt til høj-permeable zoner som for eksempel sandlinser og sprækker. Med grus som fyldmateriale kan elementet placeres i terræn med de fordele der er knyttet til det.



Figur 3: Implementering af terrænfaskine (dyb grusrende). Venstre: Frontmonteret kædegraver. Midt: Den delvist grusfyldte rende. Højre: Den færdige rende. 0.17 m bred, 15 m lang og 1 m dyb. Tilløbsbrønd ses forrest i billedet.

Effekten af terrænfaskinen er vist i Figur 4, der viser mættet hydraulisk ledningsevne, dels målt med terrænfaskinerne, dels målt med Guelph Permeameter (se del 2 i ovennævnte notat for beskrivelse af metoden). Mens Guelph Permeameteret kun måler på et lille jordareal med ringe chance for at fange makrostrukturer som sandlinser, sprækker og ormegange, viser figuren hvordan denne variation, som jorden vitterligt indeholder, fanges med terrænfaskinen. Den reelle mættede hydrauliske ledningsevne kan være op til 100 gange højere end målt med Guelph Permeameteret eller tilsvarende test.



Figur 4: Øverst: Hydraulisk ledningsevne målt på tre forskellige dage ved hjælp af de tre terrænrender, placeret i hver sin jordtype. Nederst: Sammenligning af mættet hydraulisk ledningsevne målt med et almindeligt Guelph Permeameter og reelt observeret med de tre terrænfaskiner.

Figur 4 (øverst) viser hvor afgørende det kan være at placere LAR-nedsivningselementer efter den geologiske variation. Hvis der ikke var lavet en geologisk kortlægning ville nedsivningselementet med stor sandsynlighed være placeret i området med dårligst hydraulisk ledningsevne, der udgør den største del af området (Figur 1).

Ved at sammenholde jordtypernes udbredelse med deres hydrauliske ledningsevne kan man estimere hvilken magasinkapacitet, der er tilknyttet de forskellige jordtyper. Dette er gjort i tabel 1. Heraf fremgår at områder med morænesand indenfor forsøgsarealet kan rumme ca. 176 m³, mens områder med sandet morænelerler kan rumme ca. 764 m³. Disse volumener er betydeligt lettere at udnytte til nedsivning af regnafstrømning, idet den tilhørende hydrauliske ledningsevne er markant bedre end i områder med moræneler (blå). Det ses især hvis tømmeperioderne betragtes. Det ses også at medtagelse af topjorden er en betydelig fordel.

På baggrund af gennemførte forsøg og estimater af samlet kapacitet anbefales terrænfaskiner til nedsivning af regnafstrømning. Uanset om der er behov for rensning eller afstrømningen kan nedsives direkte, vil det være nødvendigt med ekstra volumen end det volumen der opnås med terrænfaskinen. Dette kan være i form af et tørt bassin, eller regnvandskassetter indbygget i en del af faskinen. Eksempel på rensning af regnafstrømning ved hjælp af dobbeltporøs filtrering før nedsivning via terrænfaskiner er beskrevet i BiV-notat 7.

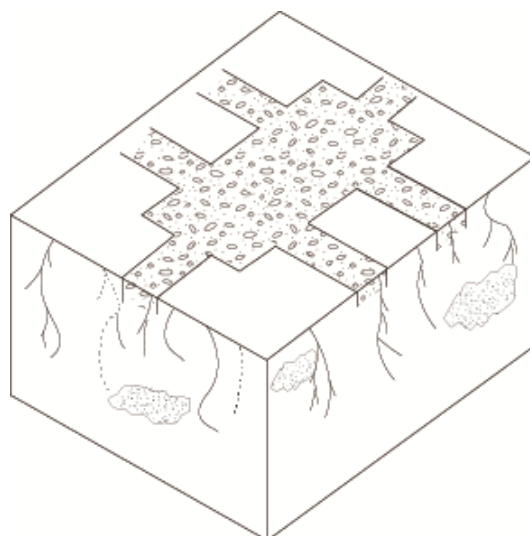
En terrænfaskine antages at være velegnet til nedsivning af regnvand i store offentlige arealer som for eksempel midterrabat, siderabat, langs cykelstier, parkeringsarealer, idrætsområder, i parker m.v.

Tabel 1: Estimering af magasinkapacitet i tre forskellige jordtyper inden for samme 100 x 100 m morænedækkede forsøgsareal ved Mårslet. Dybden antages i alle tilfælde at være 2,0 m (afstand til grundvandsspejl). Terrænfaskinens hulrumsvolumen er i alle tilfælde ca. 0,6 m³ (15 m x 0,17 m x 1 m x 25 %), og udsivningsarealet 30 m² (gennem begge sider). Tømmeperioden pr. 10 m³ regnafstrømning tilført rendefaskinen er estimeret, med og uden inddragelse af topjorden.

	Moræneler	Sandet moræneler	Morænesand
Porøsitet	0,38	0,39	0,41
Udbredelse (areal) m ²	4250	980	215
Jordtypens magasin-volumen (v. 2,0 m dybde) m ³	0,38 x 4250 x 2,0 = 3230	0,39 x 980 x 2,0 = 764	0,41 x 215 x 2,0 = 176
K _{sat} (med topjord) m/s	1,14 * 10 ⁻⁵	1,37 * 10 ⁻⁵	1,62 * 10 ⁻⁵
K _{sat} (uden topjord) m/s	9,19 * 10 ⁻⁶	1,19 * 10 ⁻⁵	1,8 * 10 ⁻⁵
Tømmeperiod pr. 10 m ³ afstrømning (med topjord)	8,1 t	6,8 t	5,7 t
Tømmeperiod pr. 10 m ³ afstrømning (uden topjord)	16,8 t	13,0 t	8,6 t

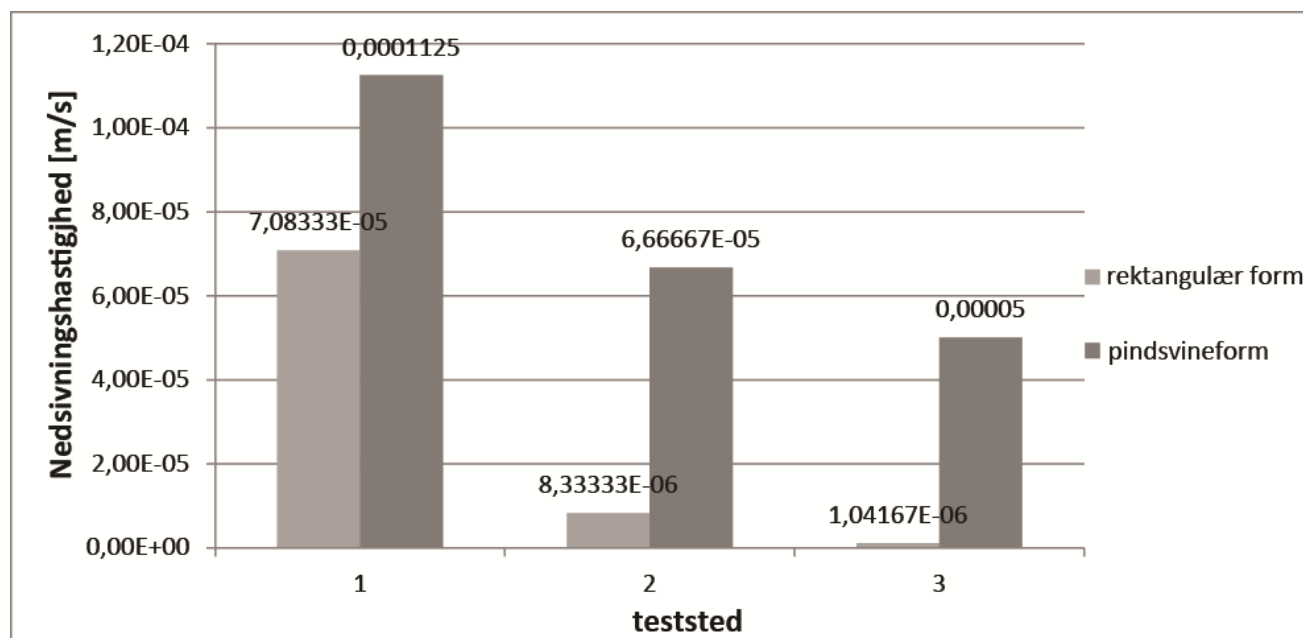
Pindsvinefaskine

Pindsvinefaskinen er en version af terrænfaskinen tilpasset mindre pladsforhold. Med en pindsvinefaskine kan tømmeperioden øges ved at forsyne en ordinær faskine med "forlænger-arme", der som piggene på et pindsvin stikker ud til alle sider. I regi af Byer i Vandbalance er afprøvet en version hvor forlængerarmene bestod af drænrør, men de kan også bestå af gruserender (Fig. 4). På samme måde som for terrænfaskinen øges chancen for at sandlinser, sprækker og bioporer krydses. Desuden øges udsivningsarealet uden at volumen – og dermed jordoverskud – gøres særlig meget større.



Figur 4: Skitse, der viser princippet i en pindsvinefaskine. Med forlængerarme (pindsvinepigge) placeret terrænnært øges sandsynligheden for at der opnås kontakt til hydraulisk aktive jordstrukturer, ligesom der kan drages fordel af den højere hydrauliske ledningsevne, større porøsitet og hurtigere udtørring i topjorden.

I figur 5 er vist resultater fra infiltrationsforsøg på moræneler. Først blev infiltrationshastigheden bestemt i tre normal-udgravninger (2 m lang, 1 m bred, 0,6 m dyb) placeret i den mest udbredte moræneform (ler). Derefter blev de samme huller forsynet med forlængerarme (6 drænrør á 3 m længde, placeret i topjorden) og infiltrationstesten gentaget. De resulterende infiltrationsrater viser tydeligt fordelene ved at forsyne den ordinære faskine med forlængerarme. Pindsvinefaskinen vurderes at være velegnet til haver og andre små arealer, hvor der kun kan arbejdes med håndkraft eller små gravemaskiner.



Figur 5: Nedsvivningshastighed i tre rektangulære huller før og efter etablering "pindsvine-pigge". Forsøgene blev udført under vandmættede forhold.

Referencer

Bockhorn, B., Klint, K.E.S., Jensen, M.B. (2014): *Stormwater management: methods for measuring near-surface infiltration*. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, 31, 47-50.

Rørcentret (2012): Bilag 1 – Simpel nedsivningstest i private haver. Anvisning 016. 5 sider.