



德國水環境再造經驗

人工溼地—創新的地區性都市 污水處理方法

Technical University Berlin, Germany / Dipl. Geogr. Katharina Teschner

世界許多地區在做污水處理時已採用「人工溼地」的方法，在德國也有為數甚多的地區性污水水處理場是使用如人工溼地和污水瀉湖等自然的技術，而較低投資運作成本是這些系統的主要優勢。

在德國，「人工溼地」是已被制定的廢水處理技術之一。這系統在1950年代開發而在1980年代廣為人知。經過不斷研究後，終在德國用水、污水及廢棄物處理組織(ATV)指引下被建構為設計基準，用於建造及處理從4位到1,000位居民產生的污水。

另一方面，德國的家庭式雨水利用系統已是一種很普遍的方式，有各式各樣的系統於市面發售。但在商業建築和公寓大樓，屋頂收集並不具有效益，原因是由於屋頂面積不夠大，無法收集足夠的雨水，所以屋頂以外的區域勢必需要與雨水貯存系統連接，這些區域包含如行人道和街道等這種明顯污染較重的公共地區。因此，從這些管道收集的雨水就需要先經過處理，故人工溼地是一種合乎生態學的雨水處理的方式。以下呈現的三個計畫也包括其他面向，如在公共及私人空間的景觀美化和水源視象化。

都會地區的雨水處理策略

在德國雨水管理傳統上都投資在經由複合式或分散式排水管連接的中央式處理系統上，現今，這系統在處理暴雨上的能力限制更為明顯。中央系統的缺乏彈性在已開發及地面更密封的新地區產生了更

多的問題。即使在人口逐年減少的德國，都市的無計劃擴展仍帶來日益增加的水流量。這些新地區在過去40年中，住宅及運輸系統用地的面積增長了超過一倍。全國的未開發地也以每天120公頃(50畝)的速度消失。

在柏林平均每年有達32宗由於排水系統的限制引致的複合式排水管滿溢，導致雨水稀釋過的污水回流至地面的事件。另一方面，由於每人每日用水量的下降，也引起這些排水溝的臭味問題。在沒有雨水的日子排水溝反而不適於處理減量的污水。這凸顯了中央式排水系統的普遍問題，它在日漸變化的環境難以產生功用。

特別是當雨水可以地區性方式處理的時候，可行的利用方式有：綠化屋頂、沖廁和花園用水、鋪設滲透地、人工都市水景。

雨水的使用

在過去的20年間，雨水利用系統已發展成一公認的技術，一般方式是在屋頂收集雨水，用作沖廁和灌溉。由於屋頂上並無有害污染物，因此在使用前不必經過處理。然而，廁所與灌溉用水的水質並不合乎飲用水的條件。

柏林有幾個試驗計畫，應用在大規模雨水利用系統。而且雨水收集處也有較污染地區，所以雨水在使用前必須經過處理，人工溼地便是一種簡單且低成本的方法。

人工溼地定義

人工溼地是一個模仿天然溼地以供人使用，由人工設計和製造的飽和基質，也是水上和 underwater 植物，生態和水源複合體。

(出自 Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural, 1989, D.A. Hammer, ed. Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan)

垂直流向溼地

表面積	> 每居民 2,5 m ²
深度	> 0,8 m
最大負載水壓	60 mm/d (= l/(m ² *d))

水平流向溼地

表面積	> 每居民 5 m ² /人
深度	> 0,5 m
最大負載水壓	40 mm/d (= l/(m ² *d))

相連地區

一般屋頂	7325 m ²
街道/停車場	4450 m ²
有雨水的樓層	87 m ²
有灌溉地區	1100 m ²

人工溼地

人工溼地如同是土壤過濾器，當中種植了不同類型的鹽土植物，也使用了基質沙礦細碎石。按著水流滲透蘆葦床的方向，人工溼地主要分成兩種：

- ◎水平流向溼地：水平地在整個溼地流通
- ◎垂直流向溼地：滲透和垂直地流通在整個溼地

污水處理的設計基準

根據 ATV 指引 A262(1998) 家庭污水(不包括小型商業區的收集區域)為平均每人每日 100 公升，都市污水(包括小型商業區的收集區域)為每人每日 150 公升。處理這些廢水的人工溼地設計參數計算為：

人工溼地的污水淨化過程融合生物過程(以在氣孔系統的微生物為基質)、力學過程(土壤表面為濾器)、物理過程(基質分子的吸收)和化學過程(土壤中的沈澱)。植物在淨化過程扮演較小的角色。它們由根部系統提供氧氣轉化，分解有機物質，防止過濾媒介物阻塞，並暫時儲存養分。

污水處理用人工溼地在化學氧氣需求(COD)，生物氧氣需求(BOD)和細菌污染上都有很好的表現，但在養分排除量上顯出限制，一般來說有局部的硝化作用。由於土壤分子吸收是排除過程的重要步驟，人工溼地的磷排除取決於基質的種類。而吸收量則取決如基質中的鐵、鋁和鈣含量。

雨水處理的設計基準

如果盡可能監控更多現存的試驗計劃，將雨水利用人工溼地列為指標的應用是可以發展的。水壓負載和保留時限將是人工溼地的大小參考和設計的最重要方向。補充水的頻率將取決於消耗量。對於垂直水流系統，間歇性補充水就足以提供去污染物所需。

Belss-/Luedickestrasse 試驗計畫

在相隔 40 年後，柏林參議院決定重新開發 1950 年代住宅區出現的最創新的雨水利用系統。為了提供足夠 87 層(相等於全居民的三分之一)廁所用的雨水，水流來源並不止於屋頂收集水，而是也直接從雨水溝取用雨水。該住宅區位於使用分散式排水系統的地區，故可把街頭下的排水溝和貯存系統連接。這系統設於其中一棟大樓的地下室，貯水容量為 160 立方公尺，可貯存相當於年降雨量 4~5% 的雨水。預計一年可利用達 58% 年降雨量的雨水。由於系統的設計是收集“第一波”的雨水，90% 的污染物會存留在系統內。經由廁所沖水剩餘的會再經過整合式處理系統後排入污水處理廠。

Belss-/Luedickestrasse 人工溼地

雨水以更新過的室內人工溼地處理為這計劃的特點之一。這溼地為兩層高只佔 2.5 平方公尺的垂直水流系



Belss-/ Luedeckestr的室內人工溼地



統。即使如此，系統可處理平均每日所用的9立方公尺雨水並有40分鐘的保留時限。溼地水再經紫外線消毒來確保水中沒有病原體。經過處理的雨水會被貯存在6立方公尺大的第二貯水器中。

研究數據

貯存容量	160 m ² (4,5 % = 25 mm)
平均日用	9,1 m ²
飲用水百分比	31 %
人工溼地面積	2,5 m ²

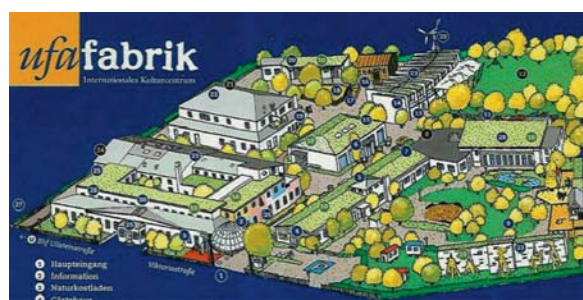
上層溼地使用8/16公釐基質擴充泥土，下層使用4/8公釐碎石，這室內溼地試驗計畫的操作精妙。雨水先被抽進上層溼地，垂直滲入濾器，濾出的水滴下下層濾器。間歇性充水帶來的固定停頓對水泵和下層濾器中的植物都會造成傷害。持續大量的滴水則會傷害葉子而使植物死去。所以選擇合適的植物是為一個關鍵。然而，固定的補充水模式仍是可能方法之一，控制第二貯水器的高度是另一個選擇。

從COD值和氨排除量可以看出，流入雨水兩值的低濃度限制了可能的排除步驟。流入雨水的COD值為平均7mg/L，而在下層溼地流出水的濃度則降為2mg/L，那是很低的數值。相對來說，1,000位居民用的小型污水處理廠可允許流出水的COD值達150mg/L。

ufafabrik 試驗計畫

歷史

ufafabrik 前身為電影業拷貝中心的文化和生態中



ufafabrik全圖

心，原在1920建立。1961年柏林圍牆建立後這裡便跟成爲東德一部份的Potsdam-Babelsberg攝影棚切斷，也失去原本用途。直到1979年一非主流運動組織從市中心搬遷到這裡。在協商後市議會決定把這地長期租用給這群藝術家。他們也是開啓在1980年代盛行並在最後爲德國帶來今天之環保標準的綠色運動的一份子。

現況

ufafabrik面積18,500平方公尺，由5個建築群所組成。當中有幾個都會生態計畫。包括太陽能發電(光電能電池最高產電量70kWh)、複合式暖氣系統、固體廢物分類和整合式雨水處理。

ufafabrik位於設有分散式排水系統的地區。街道水流入約5公尺外的Teltow運河。這運河的水質表現在德國聯邦水利工作小組(LAWA)所訂的7個等級中是最低之一。由於它是一條筆直的沒有沿水生物的人工運河的關係，它的自我潔淨可能性低。即使如此，運河仍要處理大量無定點的雨水溝進入水，暴雨沒有經過處理直接流入，密封的表面下累積的污染物使水質一直停留在低水平，

其中的有機物會導致氧氣耗盡，而附近交通流所產生的重金屬，燃料和油料殘留是有害的。

現場雨水處理

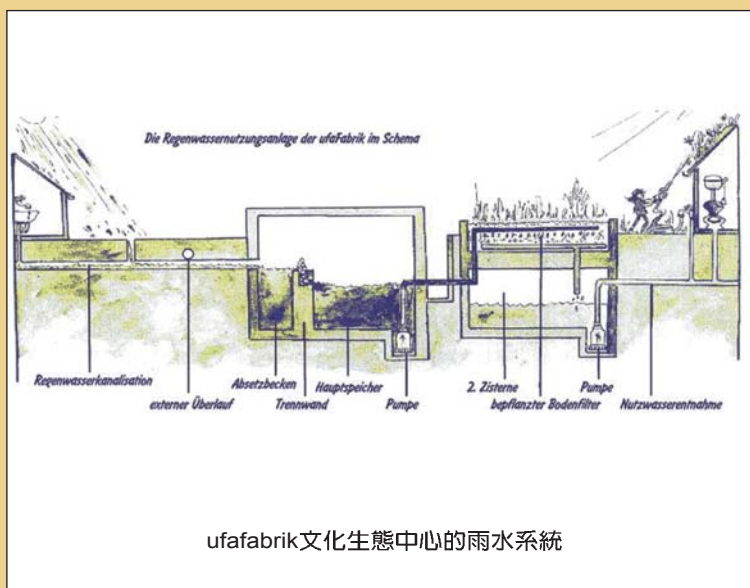
在1980年代ufafabrik重建時生態建築扮演了重要的角色。接近半數的屋頂都經過綠化。這些綠化屋頂年中保留了大量的降雨。剩下的傳統屋頂地區將不足以提供廁所和灌溉用雨水。貯存方式並非在每個屋頂上建貯水器，而是更合理的在建築基地中建立中央貯水系統並連接整個ufafabrik地區及附近街道。中央貯水器的前身是一個在過去提供軟片拷貝高品質用水的舊供水廠。通往Teltow運河的三條主雨水管只需多加一通住貯水器的水管即可互連。同時，由於收集了更多街頭水流污染物，雨水要先經處理方能使用。下一步驟就是在系統上結合一人工溼地。

整套系統總容量為240立方公尺，設有兩個貯水器，總儲存量為年降雨量的7.3%(柏林平均年降雨量為590公釐)。流入第一貯水器的雨水會先通過沈澱區使分子得以沈澱。未經處理的溢出水會先被貯存。雨水被抽進一垂直蘆葦床。在濾器底下有另一個25立方公尺貯水器。處理過的雨水會從這裡抽到廁所和園地的出水口。

在暴雨的情況下系統設有外部溢流管。這溢流管用於前期收集帶有最多污染物的“第一波”暴雨水。開始下雨時污染物會被帶進貯水器。貯水器滿溢後，雨水越過貯水器流入Teltow運河，到那階段大部分污染物將會在地表上被沖走。這種設計可提升生態效益。

這處花園密度高的社區有極高用水需求。儘管如此，83%的灌溉和沖廁用水是由暴雨水保留系統提供，只需另從公共飲水系統補充17%的水，當然廚房和廁所也可連接飲用水管。

近幾年夏季的降雨有減少的跡象，故經常當在灌溉需要正碰上乾旱時，貯水器也就空空如也了。



相連地區

一般屋頂	3100 m ²
綠化屋頂	2600 m ²
鋪設路/院子	1900 m ²
灌溉地區	6000 m ²
廁所	46間
水龍頭(園地)	9個

研究數據

貯存量	240 m ² (7,3 % = 42 mm)
平均日用	6,3 m ² (3-11m ²) = 1,04 mm
飲用水比例	17 %
人工溼地面積	25 m ²

ufafabrik中心人工溼地

這處人工溼地在1995開始運作，是屬於為一個研究垂直水流溼地中泥土堵塞計畫的一部分，其成效仍固定受監控。溼地面積為25平方公尺，深度1公尺。1/3級的基底擴充板岩為溼地帶來平均24小時的保留時間。

ufaFabrik 建構溼地

根據沖廁及灌溉用水的需求量，水壓負荷量為160到800mm/day(4到20m³/日)。夏季月份水壓負荷會較高，這也會增加固體負荷量。夏季月份的化學性氧氣需求(COD)負荷可達14.5g/(m²*d)，而合基本需求的COD值為5.8 g/(m²*d)。整個溼地的最大補充水量為361g/日。雨水系統COD排除率達70%。溼地流出水的COD濃度一般為20mg/L。

ufafabrik中心的雨水系統的平均氮排除率超過80%。流出水的氮濃度為0.14mg/L。流入到流出間水中氮排除量甚為明顯。一般來說，硝化作用都發生在水中溶氧常用盡的大型貯水系統中。

垂直水流溼地在氮排除上顯出了非常高的效率。溼地使用間隔性充水，使水在下一負載前完全滲入。這樣養分所需的氧氣就可進入濾器。氧氣傳輸的方式為大量流動和擴散。原本應該發生在水表面並耗盡氧氣的硝化作用會在雨水系統中發生。

Daimler Chrysler試驗計畫 Potsdamer Platz

Potsdamer Platz計畫是私人投資者Daimler Chrysler在1990中葉發展於重新聯合的柏林市中心的商業與公寓建築群。在兩德時期此處是荒廢地且接近柏林圍牆，所以並不吸引投資者。

新市中心發展的第一步建立了19棟建築物，地區由10條街道交叉連接，辦公空間設限為50%，住宅單位超過600間，30%的面積作休閒，零售和餐飲用地。能源效益和使用利環境原料是眾多這中心的環保建築概念之一。

現場雨水處理

市議會所發的建築許可證中明列，在風暴期間雨水緊急排入排水系統的速率不得超過3公升/秒/公畝、或是水流的1%。該發展地區位於聯合排水系統地段，故有需要避免額外的聯合排水系統滿溢。

為了遵從規定同時處理平均一年23,000立方公尺的雨水，計劃結合下列的雨水處理技術：

- ◎ 廣闊和密集的屋頂綠化。
- ◎ 由同樣為密集綠化的屋頂收集剩餘的屋頂雨水做沖廁和灌溉用。
- ◎ 雨水保留和蒸發用的人工湖（包括一人工溼地）



Daimler Chrysler地區中的都會水景(左 - 建設中 右 - 完工)

研究數據

綠化屋頂/其他屋頂面積	48.000 m ²
貯水器容量	2.550 m ³
水景系統面積	13.000 m ²
人工溼地面積	1.900 m ²

由於使用了這種獨特的方法組合，所以每一個方法都會互相配合。例如綠化屋頂用的基質要避免使用所有有機物，因為它會為人工湖帶來沖刷效果的風險。由於人工湖是引人注目的開放空間設計之一，夏季需要減少水藻的生長，且由於任何類型建築原料的分子最後都會出現在雨水之中，故屋頂的原料中不會含銅。

屋頂的綠化是整合式雨水系統的第一步。在48,000平方公尺的總屋頂面積中約有20,000平方公尺為綠化屋頂。大部分的屋頂都做廣闊式綠化，在6樓的天井則用密集式綠化。這些屋頂可做為第一步處理系統。一般來說，10公分的基質可保留約柏林年降雨量的75%，水流則已經過一次過濾。

雨水利用系統是暴雨處理系統的第二個特色。5個總容量為2,250平方公尺的互通貯水器用來收集屋頂雨水，這就相等於年降雨量的12%(66公釐)。雨水用在音樂劇場，飯店和 DaimlerChrysler辦公大樓的公共廁所。

雨水處理方法的第三步驟就是人工湖，於1998完工並對外開放。主湖面積約9,400平方公尺，整體水景面積超過13,000平方公尺，容量為15,000立方公尺。在下大雨時水位可上升30公分，相等於2,800立方公尺的額外空間。人工湖也和雨水再用系統的貯水器連接。

人工湖系統由兩個備有19個抽水器和兩個濾器的地下控制區管理，流通的水在此經過一層沙濾器，當湖中出現混濁時，將以兩個內建微濾網去除過量的水藻。



Daimler Chrysler計畫地中的密集綠化屋頂



Daimler Chrysler計劃地中的部分人工溼地

(左圖 - 1997 右圖 - 2005)

Daimler Chrysler計畫地的人工溼地

在一些不同的地區，人工溼地是人工湖水景的一部份。水平和垂直混合水流斜向流過基質層。而和所有的人工溼地相同，人工湖溼地的淨化是由溼地氣孔系統中的微生物所帶動。為了增加公眾開放地區的吸引力，主要栽種的植物是蘆葦(學名phragmites australis)，在某些地區則個別種了柳樹。

在一個供分子沈澱用的額外雨水貯池中，雨水可以被抽入1,900平方公尺的溼地，經過溼地後再流回貯水池。連續水流速可由30 m³/h到150 m³/h，運作情況則因水質而異。由於貧養湖全年均為高透明度的狀態，水中養分濃度需要十分低。那是因為人工湖雖為人工製造，它仍是一生物系統，水藻會生長在高水質的湖水之中。

早在建築群申請前，柏林技術大學已經對不同的混合物基質的選擇，針對它們的排除效率做出測試。相對於單一基質，投資者選擇使用混合了不同材料的基質。依據經驗顯示可只使用非有機基質。溼地基質中的有機化合物會加強水藻在這都會湖泊中的生長。最重要的是選擇適合的石粒大小來避免濾器結塊而產生堵塞。初次測試的0/2公釐等級基質被認定為過細。因生物薄膜產生引起泥土堵塞並不能由石粒大小或基質種類所控制。唯一的控制方法是使用間隔式充水來避免基質固定滿水。

未來遠景

污水處理程序移轉到分散式雨水處理應用的技術是具有高潛力的發展項目。污水再利用在大部份的地區的提升一定會伸展到雨水的利用上。

柏林技術大學公共衛生工程學系所推出的新策略中包括一個由德國教育研究部(BMBF)資助，研究整合污水瀉湖和薄膜過濾的兩年國際合作計畫。這複合系統的目標是為低鹽度，乾旱或半乾旱地區提供大量高品質灌溉用水。

污水瀉湖如人工溼地是一種以自然為本，自然為設計概念的分散式處理方法。加上薄膜過濾就可從流入的污水中產出極高水質的流出水。它的最大優點是留住細菌甚至大部份的病毒。這可使流出水沒有病原體。雖然只是一個簡單的過濾步驟，薄膜技術卻是一高科技的方法，不過它也可設計用在大型和小型的計畫上。現在已有很多不同的應用方式，例如飲用水加工、污水處理和去鹽作用等。雖然在盥洗廢水和雨水系統上的應用仍有待測試，但看來還是有應用在分散式高品質水供應的可能性。

總括來說，應用更分散的處理系統將會為全球提供多方面的可能性，亦可應付日益提高的高品質水需求。

