

STARKREGEN- RISIKOMANAGEMENT IN LUXEMBURG

Von Starkregengefahrenkarten zum
integralen, kommunalen
Maßnahmenkonzept 



Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation	3
2	Definition	5
2.1	Starkregenwarnstufen	7
3	Klimawandel	9
4	Starkregenrisikomanagement	Error! Bookmark not defined.
4.1	Erkennen	12
4.1.1	Starkregengefahrenkarten	12
4.2	Bewerten	16
4.2.1	Luxemburger Bemessungsregen (LuxBeRe)	16
4.2.2	Gefährdungsbeurteilung und Risikoeinschätzung.....	17
4.3	Handeln	19
4.3.1	Integrale Maßnahmenkonzepte auf kommunaler Ebene	21
4.3.2	Handlungsfelder und Maßnahmen zur Prävention	28
4.4	Messen & Verstehen	40
4.4.1	Vergangene Ereignisse	40
4.4.2	Das Forschungsprojekt „Industrial Fellowship Flashflood“ (01.12.2018 – 30.11.2020).....	46
4.4.3	Drohnenbefliegung & Monitoring 2018	49
4.4.4	Schadenserhebung	52
4.4.5	Vorhersage	53
5	Schlussfolgerung	57
6	Ausblick	58
7	Bibliografie	59

1 Ausgangssituation

Luxemburg wurde in den letzten Jahren wiederholt Zeuge von erheblichen Starkregenereignissen. Starkregen zeichnet sich durch seine sehr hohe Intensität, das heißt sehr viel Regen in sehr kurzer Zeit, aus. So sind zum Beispiel in einem Teil des Einzugsgebiets der weißen Ernz, im Juli 2016 in einer Stunde 53 mm Regen gefallen. Dies verursachte unter anderem eine Sturzflut an der weißen Ernz mit einem Anstieg von einem Meter in 15 Minuten. Maximal stieg das Wasser am Pegel Reisdorf auf ungefähr 3 Meter. Im Jahr 2018 hat gleich eine Serie von konvektiven Gewittern zwischen dem 31. Mai und 1. Juni in der Region um Larochette und Greiveldange zu Sturzfluten in Luxemburg geführt. Am 9. Juni 2018 entstanden weitere konvektive Gewitter die in kürzester Zeit zu großen Schäden im Müllertal und im Zentrum des Landes führten. Somit waren die Ereignisse 2016 und 2018 nach dem Ereignis im Juli 2021 die verheerendsten hydro-meteorologischen Ereignisse auf luxemburgischen Terrain. Im Juli 2021 kam es in einer ersten Phase auch zu erheblichen Schäden durch wilden Oberflächenabfluss und Starkregen. Dieser war jedoch nicht wie sonst gewöhnlich, sehr kleinräumig infolge von kleinräumigem, konvektivem Gewitter, sondern großflächig inmitten eines Dauerregens. Hier konvergierten zwei Phänomene. Im Rahmen eines Dauerregens, bildeten sich immer wieder Starkniederschläge die zu starkem Hangabfluss führten. Auf Grund der flächendeckenden Ausbreitung stiegen die Wasserpegel an den Flüssen nun rasant an. Auf die pluvialen flächendeckenden, lokalen Hochwasser folgte ein fluviales Rekordhochwasser.

Doch solche Ereignisse sind nicht neu, es kam zum Beispiel auch am 1. Juli 1958 in der Nähe von Echternach schon einmal zu einem ähnlichen Ereignis.

Durch Starkregen ausgelöste Überschwemmungen können immer und überall vorkommen, Starkregen fällt meist sehr kleinräumig aus und sorgt in sehr kurzer Zeit für erhebliche, lokale Überschwemmungen. Zudem sind diese Ereignisse nicht komplett vermeidbar und haben ein hohes Restrisiko, d.h. die Gesellschaft ist weit entfernt von einem absoluten Schutz. Außerdem ist die genaue Vorhersage des Ortes, der Intensität und der Ausbreitung eines Starkregens derzeit nicht möglich ist. Und anders als bei einem Winterhochwasser, das Schritt für Schritt die Ufer überschwemmt und meist länger anhält, wird die Starkregenüberschwemmung durch sein plötzliches und unvorhersehbares Auftreten gekennzeichnet, was in Folge auch die hydrologische Simulation und damit die frühzeitige Vorhersage schwierig macht.

Starkregen ist jedoch auch nicht einfach ein stärkerer Regen. Die Wetterlagen, die die Starkregenentwicklung begünstigen, sind meist konvektive Gewitter. Diese entstehen durch schnelle vertikale Anhebung von feuchten und warmen Luftmassen durch erzwungene vertikale Strömung. In größeren Höhen kühlt diese Luft ab, was zur Entstehung von dicken und hohen Wolken führt. Durch die Abkühlung in höheren Luftmassen haben diese kalten, hohen Wolken ein hohes Potential für Starkniederschlag oft verbunden mit Hagel. Weiterhin waren bei den besonders zerstörerischen Starkregenereignissen auch immer sehr langsam weiterziehende, fast stationäre Wetterereignisse oder mehrerer aufeinander folgender Gewitterfronten ein weiterer Faktor der Starkregengefahr. Regnen diese sehr großen Mengen in kurzer Dauer ab, kann das abwärts gelegene Gewässersystem dies nicht mehr aufnehmen, und es kommt zu Überschwemmungen. Obwohl ein Potential für Gewitter grob vorhergesagt werden kann, bleibt es jedoch meteorologisch fast unmöglich präzise räumliche, zeitliche und mengenmäßige Vorhersagen zu Starkregen zu machen. Weiterhin haben viele Faktoren einen Einfluss auf das hydrologische Ausmaß des Oberflächenabflusses. Topographie, Bodenart, Landnutzung, Urbanisierung, vorausgegangene Regenfälle und die damit einhergehende Wassersättigung des Bodens sowie Infiltrationskapazität bestimmen die Reaktion des Einzugsgebietes auf das Niederschlagsereignis. Innerhalb stark verstädterter Regionen reicht bereits eine relativ geringe Niederschlagsmenge um einen Infiltrationsüberschuss, siehe Überschwemmung und damit Schaden anzurichten. Je nach Bodenart und Landnutzung können in anderen Einzugsgebieten sehr starke Niederschläge unproblematisch infiltrieren und so verzögert bzw. ungefährlich abfließen.

Die Starkregengefahr und das einhergehende Schadenspotential setzen sich wiederum aus mehreren sich überlagernden Teilprozessen zusammen. Der bekannteste Teilprozess hierbei ist das wild abfließende Wasser und der Hangabfluss. Daher ist das Schadenspotential von Starkregen räumlich nicht auf die Nähe von Flüssen begrenzt, sondern in den Talwegen und an kleinen, oft unscheinbaren Gräben und Bächen befinden sich die Gefahrenhotspots. Des Weiteren, können Bäche während einem Starkregenereignis ihren Lauf durch außerordentliche Erosionsprozesse verändern. Weiterhin fallen bei Starkregen oft höhere Niederschlagsintensitäten in kürzerer Zeit als bei den üblichen Bemessungsregen (z.B. für die Dimensionierung

der Kanalisation) angenommen, so dass Schutzvorrichtungen an ihre Grenzen stoßen was die Gefahr, durch Aussetzen der Schutzfunktion von Schutzbauwerken schlagartig potenzieren kann. Die großen und schnellen Wassermassen haben zudem eine sehr hohe Erosionskapazität, was in Folge zu Aus- und Unterspülungen der Infrastruktur führen kann. Erdbeben können folgen, im Talweg lagerndes Gut wird mitgerissen. Mitgespültes Treibgut wiederum führt zu Verkläuerungen an Unterführungen und Durchlässen, wodurch diejenigen Kapazitäten schneller erschöpfen und das übermäßige Wasser sich neue Wege sucht und Zufahrtswege versperrt. Sehr hohe Fließgeschwindigkeiten entwickeln eine sehr große Kraft, mit dieser Wucht werden an Hab und Gut schwere Schäden angerichtet. Während die Hauptursache in Luxemburg hauptsächlich starke Regenfälle sind, können Sturzfluten auch durch brechende Eisstaus in Flüssen, Damm- oder Deichbrüche und Probleme der Oberflächenentwässerung in städtischen Gebieten entstehen.

Zusammengefasst entsteht aus den Faktoren der potentiellen Zunahme von Starkregenereignissen, der Schwierigkeit der präzisen Vorhersage dieser kleinräumigen und kurzfristigen, sehr intensiven Wetterphänomene in Kombination mit dem Landnutzungswandel, eine potentiell gefährliche Situation mit Charakteristiken für die, es zum derzeitigen Stand der Technik und Forschung keinen absoluten Schutz gibt und das Restrisiko, das bleibende Risiko nach Umsetzung aller Maßnahmen, hoch bleibt.

Die Sensibilisierung für die Zerstörungskraft und das enorme Schadensausmaß von Starkregenereignissen startete in Luxemburg, als nach den Ereignissen 2016 und 2018 deutlich wurde, dass die bestehenden Risikostrategien an die Auswirkungen des Klima- und Landnutzungswandels adaptiert werden müssen um das Risikopotential dieser hydrometeorologischen Phänomene in Zukunft wenigstens soweit wie möglich zu reduzieren. Zudem sollte man bedenken, dass nicht nur eine Intensivierung und steigende Zahl der Ereignisse durch Klimawandel vorausgesagt wird, sondern auch das Schadenspotential (speziell in einem kleinen Land wie Luxemburg mit kleinen Kopfeinzugsgebieten mit enormem Bebauungsdruck) stetig weiter steigt. Weiterhin schwinden mit jeder fertiggestellten Bebauung die Optionen in Richtung resilienter Raumentwicklung für folgende Generationen.

Starkregenereignisse sind jedoch nicht vermeidbar und mittlerweile, nachdem die Hochwasserrisikomanagementrichtlinie im zweiten Zyklus ihre Früchte zeigt und das klassische Flusshochwasserrisiko mit den bestgeeigneten Mitteln signifikant reduziert wird, wird es im Zuge des Klimawandels zu einem bedeutenden Umweltrisiko in Europa (Umweltbundesamt, 2018). Umso mehr bedarf es eines nachhaltigen, integralen und vorsorgenden Starkregenrisikomanagementplans, welcher auf die eventuelle Gefahr hinweist und dadurch Schäden vermeiden kann.

2 Definition

Bei einer kurzen Literaturrecherche wird schnell klar, dass keine einheitliche Definition für das oder die Phänomene des Starkregenereignisses existiert. Es gibt mehrere Definitionen für die zu differenzierenden hydrologischen oder meteorologischen Aspekte des Starkregens. Im Detail unterscheiden sich Sturzflut, urbane Überschwemmungen oder pluviale Überschwemmungen anhand vieler Kriterien. Im englischsprachigen Raum werden Starkregenphänomene oft anhand der kausal zusammenhängenden Überschwemmung („Flashflood“) definiert. Viele dieser Definitionen umfassen auch die Überschwemmung, die durch das Versagen von Dämmen und Deichen oder die Überschwemmungen, welche durch freigesetzte Eisstaus oder Flutwellen aus Gletscherseen entstehen. Die hier aufgezeigten Definitionen umfassen diese Phänomene jedoch nicht. Es wird deutlich, dass hier oft die Folgen von Starkregenereignissen und das eigentliche meteorologische Phänomen des extremen Niederschlagsereignisses vermischt werden.

Wissenschaftlich wird das Phänomen oft anhand der Zeitverzögerung zwischen Starkregen und dem Einsetzen von Überschwemmungen definiert. Weiterhin beziehen sich viele Definitionen auf die Schnelligkeit des Beginns, den Spitzenabfluss und das Volumen des Hochwassers sowie der Auswirkungen im Hinblick auf die Gefährdung von Leben und Eigentum. Im Allgemeinen kann man sagen, dass die immer wiederkehrende Charakteristik die zur Beschreibung des Phänomens in der Literatur verwendet wird, die schnelle Entwicklung ist, die den Menschen wenig Zeit lässt Maßnahmen zur Verringerung von Sachschäden und Lebensgefahr zu ergreifen.

Der Deutsche Wetterdienst definiert Starkregen zum Beispiel wie folgt und geht dabei noch spezifisch auf die oft durch Erosionsprozesse mitgeführten Bodenmassen ein:

„Von Starkregen spricht man bei großen Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit. Er fällt meist aus konvektiver Bewölkung (z.B. Cumulonimbuswolken). Starkregen kann zu schnell ansteigenden Wasserständen und (bzw. oder) zu Überschwemmung führen, häufig einhergehend mit Bodenerosion.“ (Der Deutsche Wetterdienst, 2020)

In der Enzyklopädie der Atmosphärenwissenschaften wird die Folge von Starkregen anhand der Sturzfluten wie folgt definiert:

*"Sturzfluten werden als solche Hochwasserereignisse definiert, bei denen der Wasseranstieg entweder während oder innerhalb weniger Stunden nach dem Niederschlag, der den Anstieg verursacht, erfolgt. Daher treten Sturzfluten in **kleinen Einzugsgebieten** auf, wo die **Reaktionszeit** des Einzugsgebietes **kurz** ist. Zum Teil aufgrund des schnell ansteigenden, sich schnell bewegenden Wassers einer Sturzflut können die Schäden verheerend sein."¹ (Gerald North; John Pyle; Fuqing Zhang, 2014)*

Bemerkenswert hierbei ist die spezielle Erwähnung kleiner Einzugsgebiete und deren Effekt auf die Zeitverzögerung der hydrologischen Antwort auf den Niederschlag. Im Hinblick auf die luxemburgischen topographischen Gegebenheiten und der relativ kleinen Einzugsgebietsgröße (zum Beispiel der weißen und schwarzen Ernz) ist dies von Bedeutung, zumal auch die kurze Reaktionszeit als Charakteristik eines Starkregenereignisses dargestellt wird.

Die Wetterbehörde der Vereinigten Staaten (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) geht in der Definition weiter und beschreiben das Starkregenereignis anhand der normalerweise bestehenden Feuchtebedingungen oder anhand der Zeitverzögerung zwischen Ursache und Antwort:

„schnelles und extremes Einströmen von Hochwasser in ein normalerweise trockenes Gebiet oder ein schneller Anstieg des Wasserspiegels in einem Fluss oder Bach über einen vorher festgelegten Hochwasserpegel, der innerhalb von 6

¹ Übersetzt aus dem Englischen

Stunden nach dem verursachenden Ereignis (z. B. starker Regen, Dambruch, Eisstau)²² (Sene, 2013)

Montz und Gruntfest (2002) definieren das Starkregenereignis anhand der folgenden Charakteristiken:

- Sie treten plötzlich auf, mit wenig Vorlaufzeit für die Warnung;
- Sie sind schnell fließend und zerstörerisch, was zu einer hohen Lebensgefahr und schweren Schäden an Eigentum und Infrastruktur führt;
- Sie sind kleinräumig im Hinblick auf das Wirkungsgebiet;
- Sie werden häufig mit anderen Ereignissen in Verbindung gebracht, wie Überschwemmungen an größeren Flüssen und Schlammlawinen;
- Sie sind selten.

Archer & Fowler haben das Phänomen speziell für Großbritannien wie folgt definiert:

"Ein Hochwasser, das durch kurzzeitige Niederschlagsintensität von typischerweise > 40 mm in 1 h, meist konvektiv, entsteht und die Abflusskapazität in städtischen Gebieten oder die Infiltrationskapazität in ländlichen Gebieten übersteigt und daher Land und Eigentum fernab von Flüssen überfluten kann. Die Reaktionszeit vom Erkennen des Hochwasserpotenzials bis zum Erleben der Bedrohung für Leben und Eigentum beträgt in der Regel < 1 h, kann aber bei nahezu vertikalen Wellenfronten in Flusskanälen praktisch augenblicklich sein; Flussnutzer und Auenbewohner können durch rasche Anstiegsgeschwindigkeiten des Flusspegels gefährdet werden, die durch das Versagen flussaufwärts gelegener Bauwerke oder eine vorhergehende Sättigung des Einzugsgebiets verstärkt werden können. Sturzfluten können schwere Erosionen von Hängen und Flussläufen verursachen und schwere Lasten von Treibgut und Geröll mit sich führen, die in Bermen und Terrassen abgelagert werden können"²³ (Archer & Fowler, 2015)"

Diese Definition ist sehr komplett und passt zudem gut zu den landschaftlichen Gegebenheiten Luxemburgs. Sie bezieht sich zum einen auf die urbanen Überschwemmungen jedoch auch auf die Überschreitung der Infiltrationskapazität im ländlichen Raum. Zudem wird die kurze Zeit zwischen dem Begreifen der Situation und dem Erleben der Auswirkungen beschrieben. Die kumulativen Effekte aus den Überschreitungen der Bemessungswerte der Dimensionierung von baulichen Maßnahmen werden dargestellt und auch die Bodenerosionsprozesse sowie die Gefahr durch Verklauselungen werden geschildert. Daher empfiehlt es sich hier, das Phänomen anhand dieser Definition von anderen Phänomenen abzugrenzen. Kriterien um Starkregen meteorologisch anhand der Intensität abzugrenzen werden im folgenden Kapitel zu den Starkregenwarnstufen beschrieben.

²²Übersetzt aus dem Englischen

2.1 Starkregenwarnstufen

Menge, Zeitraum, Intensität sowie dem zeitlichen Auftreten und der räumlichen Ausdehnung sind Charakteristika anhand derer Naturgefahren, und damit auch diese extremen Regenereignisse, klassifiziert werden können. Starkregenereignisse werden auch anhand verschiedener statistischer, hydrologisch-hydraulischer Ansätze für Warnungen eingestuft. Neben den extremwertstatistischen Ansätzen [siehe Luxemburger Bemessungsregen (LuxBeRe)] werden hier exemplarisch die deutschen und luxemburgischen Warnstufen zu Starkregen aufgezeigt. Zum einen die des DWD, welche die Niederschlagsmenge in Zeitintervallen von 1 Stunde und 6 Stunden unterteilen und von Dauerregen (Zeitintervalle von 12, 24, 48 und 72 Stunden) unterscheiden. (Der Deutsche Wetterdienst, 2020)

Table 1: Niederschlagsmengen, Dauerstufen und Warnungen des DWD

NIEDERSCHLAGSMENGE	ZEITRAUM	BEZEICHNUNG
15 bis 25 mm	1 Stunde	Starkregen
20 bis 35 mm	6 Stunde	Starkregen
25 bis 40 mm	1 Stunde	Heftiger Starkregen
35 bis 60 mm	6 Stunde	Heftiger Starkregen
> 40 mm	1 Stunde	Extrem heftiger Starkregen
> 60 mm	6 Stunde	Extrem heftiger Starkregen

Zum anderen klassifiziert die MeteoLux, der meteorologischen Dienst der Luftfahrtverwaltung, das Starkregenereignis wie folgt (MeteoLux, 2020):

Table 2: Niederschlagsmengen, Dauerstufen und Warnungen der MeteoLux

Orages	Avis d'orages forts	25-35 l/m ² /h
	Avis d'orages violents	> 35 l/m ² /h
Pluies	Avis de pluies fortes	31-45 l/m ² /6h ou 41-60 l/m ² /12h ou 51-80 l/m ² /24h
		Avis de pluies torrentielles

Dementsprechend wird eine gewisse Schwierigkeit der Vergleichbarkeit durch die Kombination aus Menge und Zeitintervall deutlich. Dies macht sich auch immer wieder in der Risikokommunikation bemerkbar. Aufklärung und Sensibilisierung anhand von statistischen Wiederkehrzeiten ist in Zeiten des Klimawandels nur mehr bedingt zielführend und verwirrt zusätzlich bei Regenereignissen in Kombination mit Dauerstufen und den daraus resultierenden Hochwassern. Analog zu Einordnung von Naturgefahrenereignissen wie z.B. Beaufort-Skala oder die Richter-Skala für Erdbeben, besteht die Notwendigkeit eines dimensionslosen Indices anhand dessen, Starkregenereignisse anhand ihrer Schwere eingeordnet werden könnten. So wurde von Schmitt T. G. (2015), als Hilfsmittel zur Risikokommunikation, der Starkregenindex mit Werten von 1 bis 12 vorgeschlagen. Zur vereinfachten Kommunikation können mit diesem Werkzeug Regenfälle aus Wiederkehrzeiten für Dauerstufen in Index-klassen von 1 bis 12 geordnet werden.

Wiederkehrzeit T_n (a)	1-10	20	30	50	100	> 100				
Starkregenindex	1 - 3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Regendauer	Starkregenhöhen in mm									
15 min	10 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 35	> 35					
60 min	15 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 75	75-100	100-130	130-160	160-200	> 200
2 h	20 - 35	35 - 45	45 - 55	55 - 65	65 - 80					
4 h	20 - 45	45 - 55	55 - 60	60 - 75	75 - 85					
6 h	25 - 50	50 - 60	60 - 65	65 - 80	80 - 90	85-120	120-150	150-180	180-220	> 220

Abbildung 1: Exemplarische Zuordnung des Starkregenindex für Wiederkehrzeit T_n mit Wertebereichen von Starkregenhöhen für unterschiedliche Dauerstufen. Quelle: Schmitt, 2015, DWA M-119

So kann Risiko in Relation zu Ausbauwassermengen und Bemessungsgrundlagen einfacher vermittelt werden. Entwässerungsanlagen werden demnach auf den überlastfreien Betrieb bis zum Index der Stärke 1 bis 3 bemessen. Schutzmaßnahmen sollen vor Gefahren und Risiken für Szenarien des Indizes 4 bis 5 schützen. Für Regenfälle der Kategorie 6 bis 12 können technischen Bauwerke keinen vollständigen Schutz mehr bieten und hier sollen vorsorgende Maßnahmen den Schaden begrenzen.

3 Klimawandel

Am derzeitigen Stand der Forschung ist es wissenschaftlicher Konsens, dass mit der prognostizierten Erhöhung der Temperatur, die mit der Erhöhung der klimaschädlichen Gase in der Atmosphäre einhergeht, eine Erhöhung von Wetterextremereignissen sehr wahrscheinlich ist. Beispielsweise stellten Meteorologen der Universität Berlin fest, dass nicht nur die Wahrscheinlichkeit der Häufigkeit von Starkregenereignissen zunimmt, sondern auch Menge, Dauer und Intensität (ein Maß, das Menge und die Dauer berücksichtigt) des Regens sich ändern wird (Nissen & Ulbrich, 2017). Der jüngste IPCC-Bericht (Bericht des Internationalen Panels von Wissenschaftlern zum Klimawandel (IPCC, 2018)) geht davon aus, dass es in Zukunft eine Erhöhung der Regenmenge pro Regenereignis geben wird. Tatsächlich erklärt sich dies durch einen physikalischen Zusammenhang: bei steigenden Temperaturen kann mehr Wasserdampf in der Atmosphäre gespeichert werden, wodurch größere Niederschlagsmengen zu erwarten sind. Dies hat zur Folge, dass die Regenmenge um 6-7% pro Grad Kelvin steigende Temperatur ansteigen könnte. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass aufgrund sich verändernder meteorologischer Verhältnisse, die bei sich anbahnenden Gewittern ablaufenden wolken- und niederschlagsbildenden Prozesse intensiviert werden, wodurch auch der Starkniederschläge intensiver werden könnten.

„BEI REGEN, DER AUS FEUCHTIGKEITSGESÄTTIGTEN LUFTMASSEN ENTSTEHT, STEIGT DER NIEDERSCHLAG TENDENZIELL UM 7% PRO ERWÄRMUNGSGRAD. DIESE ANSTIEGSRATE IST ALS "CC-RATE" BEKANNT, DA SIE SICH AUS DER CLAUSIUS-CLAPEYRON-GLEICHUNG IN DER PHYSIK ABLEITET, DIE DEN SÄTTIGUNGSDAMPFDRECK VON WASSER ALS FUNKTION DER TEMPERATUR BESCHREIBT. IN KONVEKTIVEN KLEINRÄUMIGEN STARKREGENGEWITTERN KANN DIESE RATE ETWA DOPPELT SO HOCH SEIN.“ (Müller, et al., 2019)

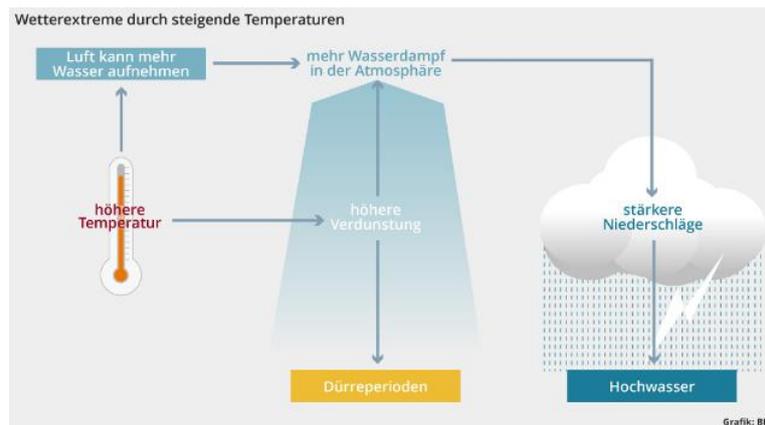


Abbildung 2: Zunahme von Wetterextremen durch steigende Temperaturen, Quelle: Bayerischer Rundfunk

Die Häufigkeit von Starkniederschlägen der Dauerstufe 24 Stunden hat in Deutschland in den vergangenen 65 Jahren im Winter bereits um rund 25% zugenommen (Becker, 2016). Gemäß den Projektionen der Klimamodelle ist davon auszugehen, dass sich dieser Anstieg bis zum Jahre 2100 in etwa der gleichen Größenordnung weiter fortsetzen wird. Präzisere Trendanalysen für kürzere Dauerstufen werden aber dadurch erschwert, dass die häufig besonders intensiven kleinräumigen Niederschläge nicht immer von den meteorologischen Stationen erfasst werden, sondern zum Teil auch dazwischen auftreten und somit durch das Raster fallen (Becker, 2016).

Zudem gibt es in vielen Ländern, so auch in Luxemburg eine Reihe weiterer (anthropogener) Treiber die das Starkregenrisiko erhöhen:

- Zunehmende Siedlungs- und Erholungsnutzung in Sturzflut-anfälligen Gebieten;
- Entwicklung von Wohnraum und Infrastruktur in Talwegen und Gefahrenzonen;
- Ausbau von städtischen Gebieten mit Auswirkungen auf die Entwässerungswege und Erhöhung des Anteils versiegelter Flächen;

- Zudem kann eine lückenhafte Instandhaltung von bestehenden Schutzstrukturen ein potentieller Faktor sein.

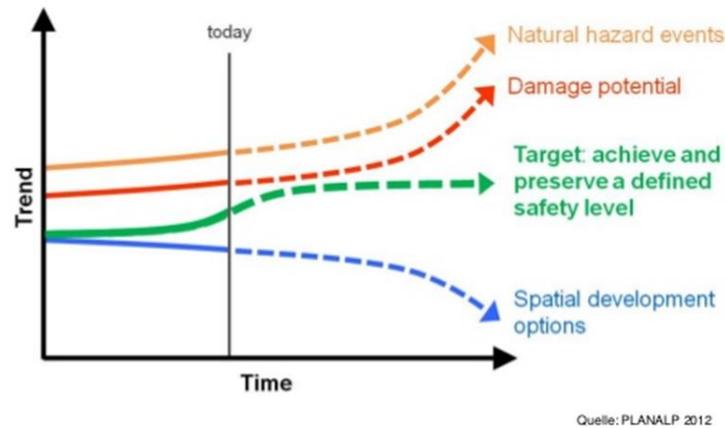


Abbildung 3: Anpassungsziel Globaler Wandel und Starkregenrisiko, Quelle: PlanAlp 2012

Mit einer ansteigenden Versiegelung der Flächen geht eine Verminderung der Möglichkeit der direkten Infiltration des Niederschlags in den Boden einher. Diese fehlende Verzögerung verstärkt den Oberflächenabfluss was zu Überlastungen der Kanalisation und nachfolgend zu Überschwemmungen führt. Zudem schwinden mit jeder neuen Bebauung die Optionen der wassersensiblen ländlichen Entwicklung. Die Infrastrukturen der Zukunft sowie exponierter Bestand müssen daher an diese neuen Herausforderungen angepasst werden.

4 Starkregenrisikomanagement

Da Starkregenrisikomanagement eine immer noch recht neue, sowie im globalen Wandel nicht-stationäre bzw. veränderliche Herausforderung darstellt, begründet sich die nationale Starkregenrisikomanagementstrategie aus dem Kreislauf des Wissensmanagements. Starkregenereignisse sind eindeutig das Ergebnis der Verkettung sowohl meteorologischer als auch hydrologischer Umstände. Die kurzzeitige und intensive Natur dieser extremen Phänomene bringt mit sich, dass es noch viele Wissenslücken um geeignete Strategien gibt. Daher geht es darum zu erkennen, welches Wissen benötigt wird um das Ziel der Minimierung des Starkregenrisikos zu erreichen und das bereits vorhandene wie auch das noch benötigte Wissen zusammenzutragen. Zudem sollen neue Erfahrungen dokumentiert und vorhandene Wissensbestände ergänzt werden. Diese wiederum werden dann in vereinfachter Form der Öffentlichkeit verfügbar gemacht.

Hierbei handelt es sich jedoch weder um ein statisches System noch um ein einmalig zu erreichendes Ziel, sondern eher um ein sich ständig wiederholenden Prozess. Dies mit dem Ziel das gesamte Wissen um Starkregenrisiko auf eine umfassende Strategie oder Leitidee zu vernetzen um verschiedene Teillösungen sinnvoll zu verknüpfen und geeignete Anstrengungen zur Minimierung des Starkregenrisikomanagements zielgerichtet zu identifizieren, zu verknüpfen und anzuwenden.



Abbildung 4: Vom Wissensmanagement zur Strategie des Starkregenrisikomanagements für Luxemburg

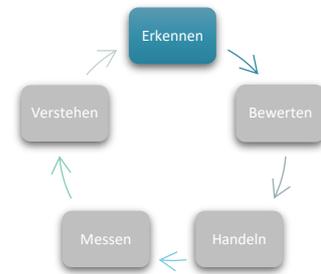
So gibt es auch hier verschiedene zeitliche und räumliche Ebenen:

- Lang- und mittelfristige Aspekte der Strategie auf nationaler Ebene, die sich aus der Dokumentation und Erforschung des Phänomens und der Weiterentwicklung der Vorhersage zusammensetzen.
- Kurz- bis mittelfristige Teile der Strategie sind wiederum die Erstellung von Datensätzen zur proaktiven Erkennung des Handlungsbedarfs und Handlungsaufwands zur Risikominimierung.
- Die kurzfristigeren und kleinräumigeren Elemente sind darauf aufbauend die Konkretisierung des Handlungsbedarfs in integralen Konzepten und die kommunale Umsetzung der in den Konzepten herauskristallisierenden Maßnahmenkombinationen.

Während eine hohe Priorität auf ökologisch orientierten Maßnahmen zur Minderung des Risikos liegt (Nature-based oder No-Regret-Maßnahmen), wird eine mittlere Priorität auf zuverlässigen Daten und der Vermeidung neuer Risikosituationen gelegt. Geringe Priorität finden indes technische oder bauliche Maßnahmen zur Risikominimierung.

4.1 Erkennen

Ein wesentlicher Bestandteil der Starkregenerisikomanagementstrategie des Wasserwirtschaftsamts ist die Erstellung nationaler starkregenrelevanter Datensätze zur Erkennung des kommunalen Handlungsbedarfs zur Minimierung des Starkregenerisikos. Grundsätzlich werden hier Hilfestellungen entwickelt und zusammengestellt, welche die Analyse, Bewertung und Sensibilisierung vor dem Starkregenerisiko vereinfacht und vereinheitlichen sollen. Diese Datensätze sollen jeder Gemeinde die Werkzeuge und Möglichkeit bieten, mit einfachen Mitteln ihr Starkregenerisiko selbst einzuschätzen, etwaigen Handlungsbedarf zu erkennen und Starkregenvorsorge proaktiv anzugehen.



4.1.1 Starkregengefahrenkarten

Warum Starkregengefahrenkarten?

Anhand der Karten wird erkennbar, wo in Ihrer Gemeinde konkrete Gefahren bei Starkregen entstehen können. Auf dieser Grundlage schätzt und bewertet die Gemeinde ihre individuelle Gefahrenlage. So können Schäden proaktiv verhindert werden und Schutzmaßnahmen im Voraus geplant werden.

Herzstück der für das ganze Land Luxemburg zur Verfügung gestellten Daten ist der Starkregenatlas. Durch die Überschneidung der bei Starkregen potentiell überfluteten Bereiche mit den Informationen zur Infrastruktur werden kritische Bereiche identifizierbar. Auf diese Weise wissen wir wo welche Infrastruktur überflutet werden könnte. Dies lässt Orte erkennen, die einem höheren Risiko ausgesetzt sind als andere. Anhand dieser Informationen kann jede Gemeinde die lokale

Starkregengefahr erfassen, das Risiko einschätzen, Handlungsbedarf erkennen und Vorsorgemaßnahmen treffen.

Die Simulation der Starkregengefährdung wurde mit dem Modell FloodArea der Firma Geomer GmbH unter Federführung des Ingenieurbüros EEPI Luxemburg berechnet. Das Modell wird in zahlreichen Projekten deutschlandweit eingesetzt und koppelt eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung an die 2D-Simulation des Oberflächenabflusses.

Die hydrologische Komponente wurde mit der Software HydroRAS modelliert. HydroRAS berechnet für ein Gebiet den prozentualen Anteil des Gesamtniederschlags, der ortsspezifisch und direkt abflusswirksam ist. Dieser Anteil wird auch als Abflussbeiwert bezeichnet. Es wird angenommen, dass der restliche Niederschlagsanteil infiltriert. Haupteinflussfaktoren für die Höhe des Abflussbeiwerts sind die Ausprägungen des Bodens, der Landnutzung und des Relief (Geomer gmbh, EEPI s.a.r.l, 2021). Eine komplexe Modellierung des Infiltrationsprozesses über mehrere Bodenhorizonte ist schon aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit der Datengrundlage für großräumige Untersuchungen ausgeschlossen (Bueche, K., Buschlinger, M., 2021). Aus der Erfahrung lokaler Niederschlag-Abfluss-Untersuchungen sind jedoch die Abflussmengen des Oberflächenabflusses nicht versiegelter Flächen bereits mit den zeitlich und räumlich variierten Abflussbeiwerten anhand des obersten Bodenhorizonts gut abzuschätzen. Bezüglich Boden und Landnutzung orientiert sich die Vorgehensweise am Ansatz des Regionalisierungsprozesses von Lutz (1984). Das integrierte und vereinfachte Infiltrationsmodell basiert auf dem physikalischen Zweistufen-Modell der sprunghaften Feuchtefront nach Dyck & Peschke (1995). Die erforderlichen bodenphysikalischen Parameter für die definierten Bodenarten nach der bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (AD-HOC-AG BODEN 2005) werden aus den Parametern von Mualem van Genuchten extrahiert (Renger et al. 2008). Der Abflussbeiwert von versiegelten

Was zeigen Starkregengefahrenkarten?

Der Starkregengefahrenkarte visualisiert Überschwemmungstiefe, Ausdehnung und Fließgeschwindigkeit in kartografischer Form anhand einer Gefährdungsmatrix.

Flächen hingegen wird nicht von Bodenart und Relief beeinflusst, wodurch versiegelten Flächen ein konstanter Abflussbeiwert zugewiesen werden kann (Geomer gmbh, EEPI s.a.r.l, 2021).

Der in FloodArea implementierte hydraulische Ansatz ist im wesentlichen Sinne eine vereinfachte zweidimensionale hydraulische Modellierung und wurde für die Berechnung von Überschwemmungsbereichen entwickelt.

FloodAreaHPC basiert auf einem modifizierten Manning-Strickler-Verfahren in einer virtuellen 16- Nachbar-Umgebung. Trägheits- bzw. Beschleunigungseffekte werden durch eine Mitführung der Geschwindigkeitsvektoren über die Iterationsschritte abgebildet. Die Vereinfachung basiert auf einer Gleichsetzung von Energiespiegellinie mit der Wasserspiegellinie, die Kompressibilität und Temperatureinflüsse werden folglich nicht abgebildet (Geomer gmbh, EEPI s.a.r.l, 2021). Es wird die komplexe Hydrodynamik des Oberflächenabflusses abgebildet, wodurch flächiger Abfluss sowie Rückstaueffekte etc. miterfasst werden. Dies erhöht zwar den Rechenaufwand, ermöglicht jedoch erst eine Ausweisung der gefährdeten Bereiche und Objekte. Das Modell FloodAreaHPC verfügt über einen rasterbasierten Ansatz, der sich sowohl auf die Eingangsdaten (z.B. Geländemodell, Rauheiten, Abflussbeiwerte) bezieht als auch auf die 2-dimensionalen hydrodynamische Modellierung. Durch entsprechende Wahl der Rasterauflösung (hier 2 m) lassen sich auch Kleinststrukturen wie Mauern in die Berechnung einbeziehen, die als leitende, hydraulische Strukturen in der Starkregenerbetrachtung wichtig sind. Der Niederschlag kann in Form einer oder mehrerer Niederschlagsganglinien und Abflussbeiwerten als Rasterdaten zeitlich und räumlich variierend für das Simulationsgebiet parametrisiert werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Berechnung des Oberflächenabflusses ist die Möglichkeit der Einbindung von Verdolungen, die das Abflussverhalten deutlich verändern können und Rückstaueffekte maßgeblich beeinflussen können. Verdolungen können in Tiefpunkten dazu beitragen, dass Niederschlagswasser z.B. unterhalb einer Straße abgeführt wird. FloodAreaHPC bietet hierzu die Möglichkeit Abflüsse aus dem Modellsystem, d.h. an der Quelle des Verdolungs-Einlasses zu entnehmen und in einer entsprechenden Zielzelle zuzugeben (Geomer gmbh, EEPI s.a.r.l, 2021).

Das Modell gibt Fließtiefe, Fließgeschwindigkeit sowie Fließrichtung für definierbare Zeitschritte als geoTIFF aus. Bei der räumlichen Auflösung des Modells wurde für die Berechnung von ganz Luxemburg als optimaler Kompromiss zwischen Rechenaufwand, Datenverfügbarkeit und Präzision eine Rasterbreite von 2x2 Meter gewählt. Hierbei wurde in der Vorversion ein Starkregen von 60mm mit einer Dauer von 1 Stunde angenommen. Am 22.07.2016 hat es beim Starkregenerereignis in der Region um Larochette in einer Stunde ungefähr 54 mm geregnet (LIST, 2018), was in etwa einem 100-jährigem Niederschlag entsprach. Diese Annahme wurde ganz bewusst gewählt um zu verdeutlichen was an anderen Orten passiert wäre wenn es dort ebensoviel geregnet hätte. In der finalen Version wurde das Ausmaß der Überschwemmungen für verschiedene Starkregenszenarien berechnet (20-jährig, 50-jährig und 100-jährig jeweils für die Dauerstufe 60Minuten). Als Ergebnis der Studie wurden Starkregenkarten für fünf untersuchte Starkregenszenarien erstellt, welche folgenden Eigenschaften haben:

- Verwendung eines digitalen Geländemodells (2 x 2 m Rasterweite) mit hydraulisch relevanten Strukturen;
- Berücksichtigung wichtiger unterirdischer Transportwege wie z.B. Gewässerverrohrungen, Durchlässe;
- unter der Annahme, dass das Kanalnetz eine vernachlässigbare Rolle spielt (keine Berücksichtigung durch Kopplung des Kanalnetzes);
- Simulation eines 20-jährlichen, 50-jährlichen, 100-jährlichen und 200-jährlichen endbetonten Niederschlags sowie eines 100-jährlichen Niederschlags ohne Verrohrungen (d.h. mit Verklausungen der Durchlässe);
- ungleichförmige Beregnung des gesamten Staatsgebietes mit den statistischen Luxemburger Bemessungsregen (LuxBeRe);
- Darstellung der maximalen Wasserstände über alle Zeitschritte der Simulation.

		Fließgeschwindigkeit			
		< 0.2 m/s	0.2-0.5 m/s	0.5-2 m/s	> 2 m/s
Wassertiefe	4-10 cm	mäßig	mäßig	hoch	hoch
	10-40 cm	mäßig	hoch	hoch	sehr hoch
	40-100 cm	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch
	> 100 cm	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Wasserfläche		dauerhafte Wasserfläche			

Abbildung 5: Matrix der flächendeckenden Gefährdungsklassifizierung. Angelehnt an LUBW (2019): Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Anhang 6

Unter maps.geoportal.lu – Wasser – Hochwasserrisikomanagement Richtlinie - Starkregen können die Karten eingesehen werden. Hier wird aus Visualisierungsgründen die Gefahr anhand einer Gefährdungsmatrix dargestellt. Es handelt sich um die Gefährdung bei einem 100-jährigen Niederschlag. Die Matrix visualisiert die Ausdehnung der potentiellen Gefahr einer Überschwemmung in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit (ab einer Fließgeschwindigkeit über 2 m/s) und der Fließtiefe (ab einer Wassertiefe über 4cm). Sie ist so eine grafische Repräsentation bzw. eine Annäherung der potentiellen Gefahrenlage bei Starkregen. Die Begründungen für diese Klassifizierung können dem Leitfaden für Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Anhang 6, wie folgt entnommen werden:

- Mäßige Gefahr bei > 5 cm Wassertiefe, da prinzipiell eine Gefährdung für den Menschen besteht sobald der Boden nicht mehr sichtbar ist (zum Beispiel durch Kanaldeckel)
- Bis 40 cm Wassertiefe besteht eine mäßige Gefahr für Kinder unabhängig der Fließgeschwindigkeit (Cox et al. 2010), für Kleinkinder droht Ertrinkungsgefahr
- Fließgeschwindigkeiten von > 0.5 m/s: Gefahr für Leib und Leben beim Versuch, sich durch den Abflussstrom zu bewegen (LUBW 2019)
- Ab 40 cm Wassertiefe schwimmen mittelgroße PKW auf (Ball et al. 2019, Shand et al. 2011)
- Bei < 10 cm Wassertiefe:
 - Überflutung und Wassereintritt durch ebenerdige Kellerfenster oder ebenerdige Lichtschächte von Kellerfenstern
 - Wassereintritt in tieferliegende Gebäudeteile, z. B. (Tief-) Garageneinfahrten
 - Wassereintritt durch ebenerdige Türen mit möglicher Schädigung von Inventar

Weiterhin wurde eine Risikokarte erstellt. Diese resultiert aus einer Verschneidung der Landnutzungsdaten mit der Überschwemmungsausdehnung (ab einer Wassertiefe über 4cm). Hierbei wurde das Risiko jedoch nicht anhand von Faktoren wie Exposition, Resilienz oder Vulnerabilität klassifiziert. Aus Gründen einer bestmöglichen Kohärenz wurde die Risikodarstellung an die Darstellung aus den Hochwasserrisikokarten angelehnt.

Die Rohdaten können beim Wasserwirtschaftsamt unter flashfloods@eau.etat.lu angefragt werden.

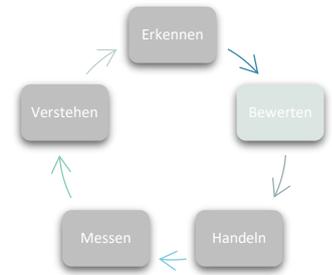


Abbildung 6: Auszug der Starkregenkarte für Düdelingen und das Stellwerk Bettembourg. Berechnungszeit: 1 Stunde (+ 4 Stunden Nachlaufzeit). Wiederkehrintervall: 100-Jährlich

Der erste Schritt bei der Aufstellung eines kommunalen Starkregenrisikomanagementkonzepts ist demnach der Blick auf die nationalen Starkregengefahren und –risikokarten. Mit dieser Hilfe kann eingeschätzt (siehe Erkennen und Bewerten) werden, wo während oder nach einem Starkregen sich Fließwege bilden bzw. sich Oberflächenabfluss sammelt und es zu Überschwemmungen kommen könnte. Das Wasserwirtschaftsamt stellt damit eine wichtige Grundlage für die Gefährdungsanalyse durch Starkregen bereit.

4.2 Bewerten

Die Risikobewertung stellt den nächsten Teil innerhalb des Risikomanagementkreislaufts dar und beinhaltet die quantitative oder qualitative Evaluierung der Bedeutung eines Risikos. Die Risikobewertung besteht nach der Identifizierung aus zwei Schritten, nämlich der Risikoabschätzung und der Risikobewertung. Die Risikoeinschätzung beinhaltet die Größen-/Häufigkeitsbeziehungen und wirtschaftliche Kosten der Gefahr. Darüber hinaus besteht die Risikobewertung aus den sozialen Folgen des abgeleiteten Risikos.



4.2.1 Luxemburger Bemessungsregen (LuxBeRe)

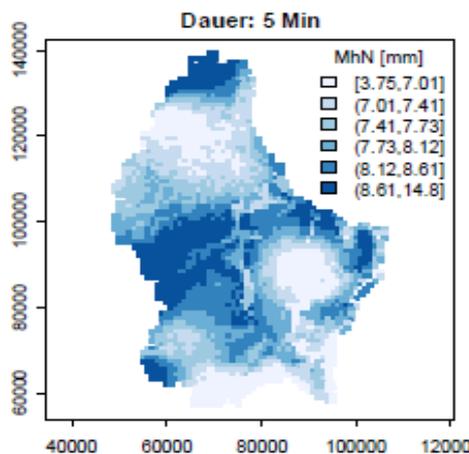


Abbildung 7: Regionalisierte Niederschläge für Dauerstufe 5min

Da es in Luxemburg bis 2020 eines eigenen Bemessungsregendatensatzes fehlte, mussten bei der Dimensionierung von Anlagen zur Regenwassersammlung und -ableitung bisweilen teilweise starke Annahmen und Vereinfachungen gemacht werden. So wurden Werte aus naheliegenden KOSTRA-Kacheln des DWD mit Umrechnungsfaktoren nach Luxemburg übertragen. Die Unsicherheiten durch diese pragmatischen Vereinfachungen in den Bemessungsgrundlagen führen potentiell zu Unschärfe bei Projektierungen.

Aus diesem Grund hat das Wasserwirtschaftsamt eine Studie zur statistischen Auswertung der Niederschlagsdaten Luxemburgs durchführen lassen, die zu einem einheitlichen Bemessungsregen für viele Dauerstufen und Jährlichkeiten geführt hat.

Für die Auswertung der Niederschläge sind die Zeitreihen von 105 Messstellen von sieben Datengeber sowie angeeichte RADOLAN-Datensätze mit eingeflossen. Das für die Regionalisierung zugrunde gelegte Zielgitter hat eine Maschenweite von 1x1 Kilometer. Hierauf wurde ein Bemessungsregen für die Dauerstufen D=5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 45min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 9 h, 12 h, 18 h, 1 d, 2 d und 3 d, und die Jährlichkeiten T=1, 2, 3,5, 10, 20, 50, 100, 200 und 1000 abgeleitet.

Interessant hierbei ist, dass auch andere Analysen zur Herleitung von Formparametern und/oder erklärenden Variablen in diesem Projekt ergeben haben, dass es für kurze Dauerstufen keinen Zusammenhang zwischen Topografie und Niederschlag gibt.

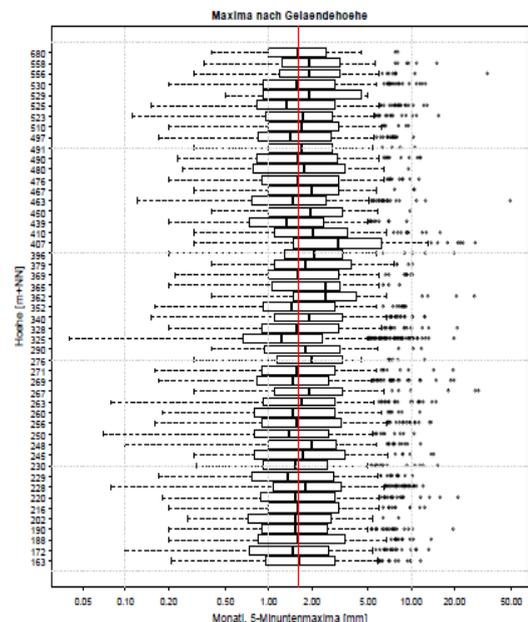


Abbildung 8: Maxima nach Geländehöhe. Quelle: Willems, 2020

So zeigt zum Beispiel Abbildung 8, dass hier keine Abhängigkeit der Niederschlagsmaxima von der Geländehöhe erkennbar ist. Wäre hier eine Abhängigkeit der Niederschlagsmaxima von der Geländehöhe erkennbar, wären topografisch tiefer liegende Stationen links des Mittelwerts, höher liegende Stationen rechts der roten Linie.

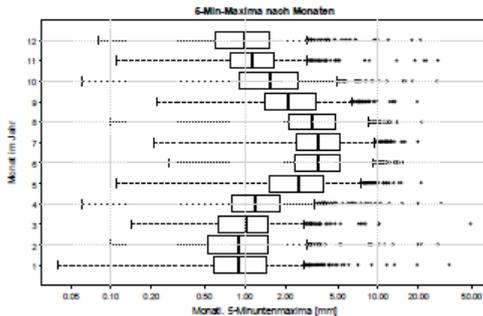


Abbildung 9: Verteilung der monatlichen 5-Minutenmaxima nach Monaten. Quelle: Willems, 2020

Einen orografischen Effekt wurde erst ab längeren Dauerstufen deutlicher. Dies zeigt, dass hauptsächlich das Abflussgeschehen lokal vorhergesagt werden kann, intensive Niederschläge jedoch keinen orografischen Zusammenhang haben.

Anders jedoch zeigt sich dies in der Saisonalität. Während hier die kurzen Dauerstufen deutliche höhere Höchstwerte im Sommer haben als im Winter, ist dieser Effekt nicht mehr bei längeren Dauerstufen zu erkennen.

4.2.2 Gefährdungsbeurteilung und Risikoeinschätzung

Risiko = Gefahr x Vulnerabilität

Die **Gefahr** ist ein unausweichlicher Bestandteil des Lebens. Gefahr wird definiert als *"ein potenziell schädliches physikalisches Ereignis, Phänomen oder*

menschliche Aktivität, das den Verlust von Leben oder Verletzungen, Sachschäden, soziale und wirtschaftliche Störungen oder eine Schädigung der Umwelt verursachen kann" (UN/ISDR, 2005). Zu den Gefahren können Zustände gehören die zukünftige Bedrohungen darstellen und unterschiedliche Ursprünge haben können oder aber auch durch menschliche Prozesse verursacht werden.

Risiko ist das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer natürlichen (geologischen, hydrometeorologischen und biologischen) oder anthropogenen (umwelt-destruktive und technologische) Gefahr und der **Vulnerabilität** oder Verwundbarkeit betrachtet.

Vulnerabilität wird definiert als *"die Bedingungen, die durch physische, soziale, wirtschaftliche und umweltbezogene Faktoren oder Prozesse bestimmt werden und die die Anfälligkeit einer Gemeinschaft gegenüber den Auswirkungen von Gefahren erhöhen"* (UN/ISDR, 2005). Das Konzept der **Vulnerabilität** zeigt wie Risiko und Gefahr auf einen potentiellen zukünftigen Zustand hin. Die meisten Ansätze zur Verringerung der Vulnerabilität auf Systemebene können entweder als Ausdruck der Resilienz, der Wiederherstellung oder der Zuverlässigkeit betrachtet werden.

Im Gegensatz zu Gefahr und Risiko handelt es sich bei einer Katastrophe nicht um eine potentielle Bedrohung, sondern um ein tatsächliches Ereignis, so dass eine **Katastrophe** als *"die Verwirklichung der Gefahr"* definiert werden kann. Eine detailliertere Definition von Katastrophen ist *"ein zeitlich und räumlich konzentriertes Ereignis, bei dem eine Gemeinschaft eine ernste Gefahr und eine Unterbrechung ihrer wesentlichen Funktionen erlebt, begleitet von weitreichenden Verlusten an Menschen, Material oder Umwelt, die oft die Fähigkeit der Gemeinschaft übersteigen, ohne Hilfe von außen zurechtzukommen"* (UN/ISDR, 2005).

Vulnerabilität = Exposition x Resilienz

Resilienz = Widerstandskraft x Wiederherstellung

Resilienz wird definiert als *"die Fähigkeit eines Systems, einer Gemeinschaft oder Gesellschaft,*

die potenziell Gefahren ausgesetzt ist, sich anzupassen, indem sie Widerstand leistet oder sich verändert, um ein akzeptables Funktions- und Strukturniveau zu erreichen und aufrechtzuerhalten. Dies wird durch den Grad bestimmt, in dem das Sozialsystem in der Lage ist, sich selbst zu organisieren, um diese Fähigkeit zu erhöhen, aus vergangenen Katastrophen für einen besseren Schutz in der Zukunft zu lernen und die Maßnahmen zur Risikominderung zu verbessern" (UN/ISDR, 2005). Die **Zuverlässigkeit** hingegen spiegelt die Häufigkeit wider, mit der Schutzvorrichtungen gegen Gefahren schützen und standhalten (UN/ISDR, 2005).

Ein 100-prozentiger zuverlässiger Schutz vor Starkregenereignissen ist nicht möglich. Diese Ereignisse sind nicht nur von kurzer Dauer und kleinräumig, sondern sind auch überall und nicht wie bei klassischem Hochwasser im

Umland eines Flusses zu vermuten. Dies hat Auswirkungen auf die Herangehensweise an diese Problematik: es müssen **Schutzziele** definiert werden. So ist es zum Beispiel nicht möglich, jeden Regenwasserkanal so zu dimensionieren, dass ein Starkregenhochwasser gefahrlos aus der Risikozone abgeleitet werden könnte. Durch geeignete Maßnahmen kann jedoch das Schadenspotential und das Gefährdungspotential verringert werden. Im Starkregenrisiko muss daher ein Paradigmenwechsel erfolgen, von öffentlichen Schutzversprechen zu bewusstem Umgang mit Risiko, Gefahr und Vulnerabilität. Da technische Maßnahmen nicht unlimitiert zur Reduzierung von Starkregenrisiko beitragen können, wird Starkregenrisikomanagement zur gemeinsamen,



Abbildung 10: Aus der Risikotheorie entsteht ein Handlungskonzept angelehnt an: (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, 2021)

gesellschaftlichen Anstrengung. Indirekte Maßnahmen des Risikomanagements müssen aktiviert werden, um trotz der besonderen Stärke dieser Ereignisse bestmöglich vorbereitet zu sein. Bis vor kurzem lag der Schwerpunkt auf der Frage, ob die technischen Strukturen jetzt durch vorausschauende und vorsorgliche Maßnahmen zur Risikominderung gestärkt werden müssen. Jeder einzelne kann jedoch bereits mit kleinen Maßnahmen eine Verringerung der potenziellen Gefahr und der eigenen Verwundbarkeit erreichen und somit das Risiko verringern. Gerade dieses risikominimierende Denken erfordert eine Betreuung in den Kommunen, aber auch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit in den Verwaltungen und eine bewusst undramatische und aufgeklärte Auseinandersetzung mit dem Thema Risiko durch Umweltgefahren.

Grundsätzlich sollen daher 3 Fragen beantwortet werden:

- Was kann passieren?
 - Welche Gefahren drohen bei Starkregen?
 - Welche Fließwege entstehen? Wo kommt es zu Überschwemmungen?
 - Welches Schadenspotential besteht?
- Was darf passieren?
 - Wo kann das Wasser schadlos abgeführt werden?
 - Welches Schutzziel ist vertretbar?
 - Wie geht man mit dem Restrisiko um?
- Was ist die beste (zielführendste) Kombination an Maßnahmen im Einzugsgebiet (von der Hochebene zur Senke)?
 - Welche Potentiale zur Problemlösung bestehen?
 - Wie können wir das Schutzdefizit zielführend und nachhaltig beheben?

Diese drei Fragen aus Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmen bilden somit das Grundgerüst der Bewertung aus der Strategie zum Umgang mit Starkregenrisiko in Luxemburg.

4.3 Handeln

Nachdem der Handlungsbedarf mit den zur Verfügung stehenden Werkzeugen nun erkannt worden ist und eine erste Bewertung des Risikos, Hotspots, Defizite und Potentiale aufgedeckt wurde, startet die Entwicklung des kommunalen Maßnahmenkonzepts.

In einem **integralen, kommunalen Maßnahmenkonzept** soll nun ein koordiniertes Paket an aufeinander abgestimmte Maßnahmen für jede Gemeinde erstellt werden. „Koordiniert“ und „aufeinander abgestimmt“ bedeutet, dass auch die Zusammensetzung des Maßnahmenpakets auf positive oder negative Wechselwirkungen der Maßnahmen untersucht werden soll. Es muss jeweils die effektivste Maßnahmenkombination im Sinne von ökologischer, ökonomischer und sozialer zielführender und langfristiger Planung gesucht werden. Speziell bei Starkregen können Maßnahmen die Einen schützen und gleichzeitig verheerende Auswirkungen auf Hab und Gut von Anderen haben. Die geringen Wiederkehrzeiten und die kleinen räumlichen Ausdehnungen der Ereignisse erfordern unbedingt zielführende (No-Regret-) Maßnahmen um die Verhältnismäßigkeit zu wahren.

Diese koordinative Aufgabe ist äußerst komplex und bedarf einem Paradigmenwechsel: weg vom schnellen Betätigungsdrang zu einer interdisziplinären und zukunftsweisenden langfristigen Planung. Der konventionelle Wasserbau begründete bis vor Einführung der Wasserrahmenrichtlinie Eingriffe im Wesentlichen mit technischem Hochwasserschutz, der Landgewinnung, Wasserkraft, Bewässerung und der Schifffahrt und so war die Wasserwirtschaft lange Zeit rein Utilitaristisch.

Nachhaltige Entwicklung wurde schon 1987 von der World Commission on Environment and Development definiert: „Eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“ (Brundtland Commission, 1987)

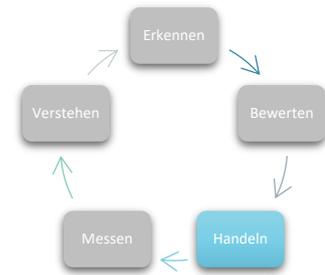


Abbildung 11: Historisches Bild zeigt veraltete Wasserwirtschaftspraktiken: Entwässerung, Regulierung, Drainage.
Quelle: (Grambow, 2013)

Mit diesen altmodischen Paradigmen kämpfen europäische Flussgebiets- und Hochwasserrisikomanager bis heute. Dabei waren die Situationen auch beim Hochwasserschutz im technokratischen Zeitalter nicht besser. Lange Zeit wurde Hochwasserschutz ausschließlich mit technischen Maßnahmen sehr oft durch Abflussbeschleunigung bewältigt. Diese führten jedoch jeweils beim Unterlieger zu steigenden Hochwässern und

begründeten damit einen Teufelskreis. Mit Schutzwasserbau wurden Sicherheiten geschaffen, die wiederum zu einem Anwachsen des Schadenspotentials durch falsche Schutzversprechen führten. In Kombination mit parallel betriebener Landgewinnung zur intensiv nutzbaren Agrarflächen in ehemals Retentions- und Feuchtgebieten wurde die Situation zudem verschärft.

Dieses globale Muster ist auch heute leider noch allgegenwärtig und Bestandteil vieler Diskussionen. Dies obwohl die so geschaffenen Risiken zu enormen Schadenssummen und zu einer Schwächung der Resilienz unserer Gesellschaft führt. Eine ökonomische und ökologische (manchmal auch kultursoziale) Evaluation wird trotzdem immer noch als bremsenden Prozess missverstanden. Sie müsste jedoch als zukunftsgerichtete Planung gesehen werden, welche die Umsetzung durch Einbeziehung der Interessensvertreter und Kommunikation möglichst langfristig validiert. Schlussendlich geht es jedoch in jedem Fall um die Antwort auf die Frage: Was macht ein Starkregenerisikomanagementprojekt erfolgreich und wie kann ich mich der Antwort auf diese Frage annähern? (Grambow, 2013).

Die Entwicklung eines integralen, kommunalen Maßnahmenkonzepts soll daher auch nicht einfach nur ein Sammelsurium von Maßnahmen sein. Sämtliche komplexe Wechselwirkungen im System eines Einzugsgebiets müssen beim Vorschlag von Maßnahmen evaluiert werden. Dies ist jedoch, aus Zeit- und Kostengründen nur begrenzt umsetzbar und fordert daher, dass möglichst alle Interessen aller Beteiligten und Betroffenen kommuniziert und integriert werden. In dem Sinn bedarf es einem starken Aufwand in der interdisziplinären Zusammenarbeit und der Förderung des gegenseitigen Verständnisses, was durchaus zeitaufwendig werden kann. Dies gewährleistet jedoch auch die Qualität des kommunalen Starkregenerisikomanagementkonzepts bzw. der daraus hervorgehenden Maßnahmen. Im Folgenden werden zuerst mögliche Handlungsfelder aufgezeigt bevor die Arbeitsschritte für kommunale Maßnahmenkonzepte beispielhaft dargelegt werden.

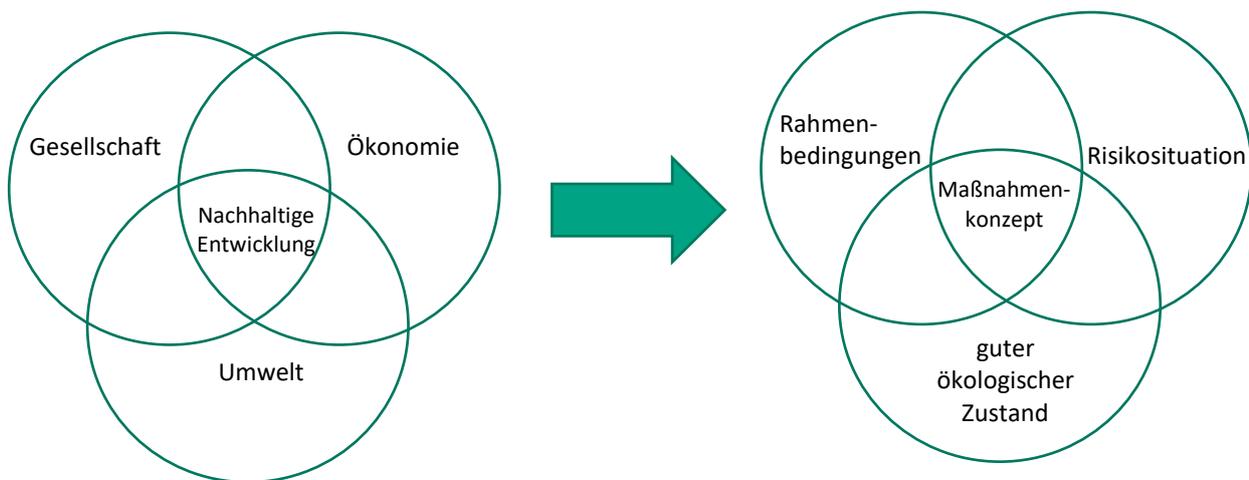


Abbildung 12: Aus Nachhaltigkeitstheorie wird integrales Maßnahmenkonzept

4.3.1 Integrale Maßnahmenkonzepte auf kommunaler Ebene

Im Bereich der Entwicklung der kommunalen Maßnahmenkonzepte und der Umsetzung der lokalen Maßnahmen fällt die Schlüsselrolle auf die Gemeindeverwaltungen. In den Bereichen Vorsorge, Bewältigung und Wiederaufbau sind die Gemeindeverwaltungen Wissensträger, haben die lokalspezifische Kenntnis und organisieren Teile des Krisenmanagements im Ereignisfall. Die konkrete Beschäftigung vor Ort mit Starkregen sowie die Erstellung von Maßnahmenkonzepten ist daher Aufgabe der Gemeindeverwaltungen. Dies passiert jedoch mit der bestmöglichen Unterstützung des Wasserwirtschaftsamts insbesondere in Bezug auf die fachlichen Grundlagen und der Erarbeitung grundlegender Maßnahmenoptionen.

Ein integrales Maßnahmenkonzept stellt hohe Anforderungen an das beauftragte Ingenieurbüro, da es in der Regel große Teile einer Gemeindebevölkerung betrifft und eine interdisziplinäre Aufgabe darstellt, welche einen intensiven Austausch zwischen den beteiligten Akteuren sowie eine Koordination der zu treffenden Maßnahmen erfordert. Nachhaltige Lösungen sind ein permanenter Abwägungsprozess zwischen verschiedenen Belangen. Zudem müssen in der Bestandsaufnahme die schrittweise Aufarbeitung der komplizierten Sachverhalten und in der Projektplanung sämtliche Auswirkung und Inhalte so transparent wie möglich für alle Beteiligten und Betroffenen dargelegt werden (Grambow, 2013). Daher ist auch die Beteiligung der Öffentlichkeit zur Koproduktion des Wissens notwendig um das Ziel der Integration zu erreichen.

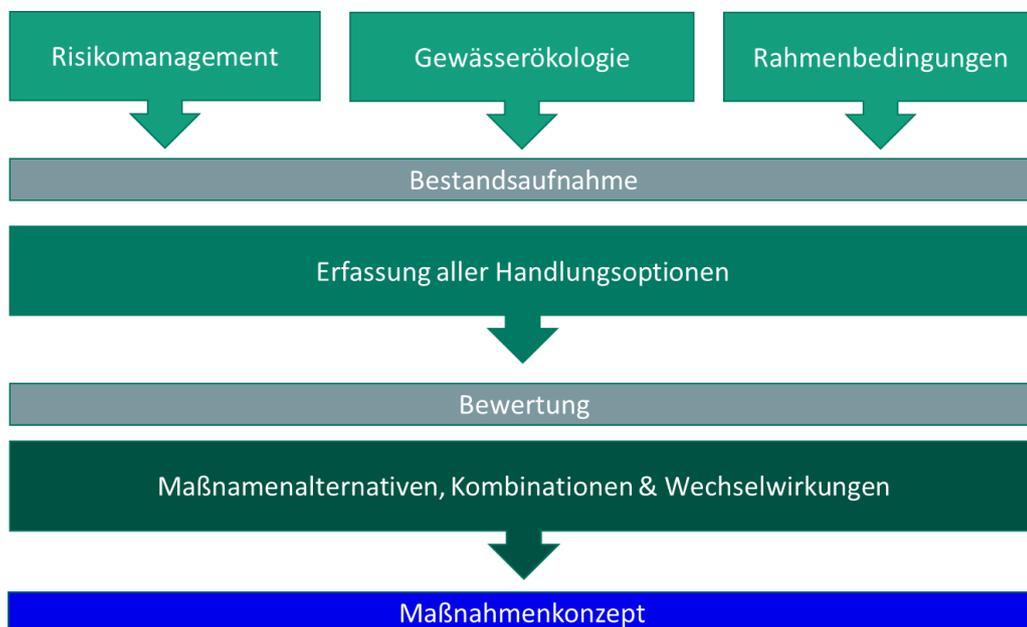


Abbildung 13: Fachlich und zeitliche Komponente eines kommunalen Maßnahmenkonzepts. Adaptiert nach: (Ministerium für ein lebenswertes Österreich, 2017)

In Abbildung 13 werden die einzelnen Bereiche aus Ökologie, Risikomanagement und Rahmenbedingungen, sowie Bearbeitungsschritte in der Erstellung eines Starkregenrisikomanagementkonzepts schematisch dargestellt. Im folgenden Kapitel wird auf die Punkte nochmal detaillierter eingegangen.

Bearbeitungsschritte auf dem Weg zum kommunalen Maßnahmenkonzept

Die Bearbeitungsschritte zur Erstellung von kommunalen Maßnahmenkombinationen werden in charakteristische Teilaufgaben untergliedert, die im Folgenden näher erläutert werden. Die Module sind in Abbildung 14 überblicksartig dargestellt.

Bestandsaufnahme	<i>Synthese aller zur Verfügung stehender Informationen und Analyse spezifischer Bedingungen</i>	<ul style="list-style-type: none"> Problembeschreibung Ermittlung der Vulnerabilität Ermittlung der Rahmenbedingungen Ermittlung der Anforderungen an die Gewässerökologie Ermitteln und Festlegen der Ziele
<i>(Optional)</i> Erweiterte hydraulische Gefährungsanalyse	<i>Erstellung von hochaufgelösten (<2x2m) Starkregengefahrenkarten unter Anwendung eines hydrodynamischen Simulationsmodells</i>	<ul style="list-style-type: none"> Hydrologie & Hydraulik Durchlässe Vermessung
Alternativensuche & Bewertung der (Aus-) Wirkung	<i>Maßnahmenformulierungen, Erfassung aller möglicher Handlungsalternativen, Reduktion der Handlungsalternativen durch Bewertung von Wirkung, Kosten-Nutzen und Naturverträglichkeit</i>	<ul style="list-style-type: none"> Nutzen-Aufwand Wirksamkeit-Kosten Wartungsaufwand Ökologische Aspekte Gestalterische Aspekte (bzw. Raum- und Landschaftsplanerische Aspekte) Flächenverfügbarkeit
<i>(Optional)</i> Ableitung von Sofortmaßnahmen	<i>Einfache und kostengünstige "NoRegret"-Maßnahmen, welche das Starkregenisiko deutlich verringern, ohne neue Risikosituationen zu schaffen und ohne die Natur zu schädigen, können in Absprache mit der AGE schneller umgesetzt werden.</i>	<ul style="list-style-type: none"> Win-Win und NoRegret Maßnahmen Dreidimensionale Rechen Einlaufbauwerke optimieren
Maßnahmenkonzept	<i>Ableitung eines integralen Maßnahmenkonzepts zur Erreichung der definierten Ziele. Entwicklung des Maßnahmenkonzepts.</i>	<ul style="list-style-type: none"> Zusammentragen von Maßnahmenkombination Priorisierung der Umsetzung & Zeitplan

Abbildung 14: Module eines kommunalen Maßnahmenkonzepts – geordnet nach Bearbeitungsschritten. Adaptiert an Quelle: (Ministerium für ein lebenswertes Österreich, 2017)

Bestandsaufnahme

Zur Lösung der Problemstellung müssen alle relevanten Rahmenbedingungen in einer Bestandsaufnahme erfasst werden. Als Synthese aller zur Verfügung stehender Informationen sollen sich in dessen Analyse, die **einzugsgebietsspezifischen Bedingungen** herauskristallisieren. Einzugsgebietsspezifische Starkregen/Sturzflutproblematik, Rahmenbedingungen, Anforderungen an die Gewässerökologie und Zielvorgaben bilden die Grundlage für die Erfassung aller Maßnahmenalternativen. Zur Problemanalyse gilt die Feststellung der Starkregenproblematik. Im Grunde geht es hier um die grundlegenden hydrologisch und hydraulisch relevanten örtlichen Gegebenheiten die aus einem gewissen Starkregen eine Sturzflut entstehen lassen: Hydrologie, Ökologie, Exposition, Entwässerungsplan usw. Ähnlich der Starkregenisikomanagement Strategie geht es hier um das **Erkennen** und das **Bewerten** des Risikos, jedoch **auf kommunaler Ebene**.

Dies kann anhand von verschiedenen Detailgraden passieren: Anhand von einfacheren topografischen Fließwegeanalysen oder aufwändigeren hydraulischen Gefährdungsanalysen (siehe Abbildung 14 Optionale hydraulische Gefährdungsanalyse). Zudem gehört zur Beschreibung der IST-Situation auch eine Beschreibung der Vulnerabilität (Exposition und/oder Widerstandskraft) der gefährdeten Infrastruktur. Im Schritt der Synthese aller Rahmenbedingungen sollen sämtliche Daten beschaffen werden, die für die integrale Beschreibung des einzugsgebietsspezifischen Starkregenisikos und der wasserwirtschaftlichen Entwicklung benötigt werden. Dementsprechend können die Quellen und Pfade der Gefahr sowie die Rezeptoren und Konsequenzen auch anhand einer „**Source – Paths – Receptor – Konsequenz**“ – Analyse identifiziert werden, wie im Interreg-Projekt „Rainman“ empfohlen (Rainman-Project - Interreg, 2021).

Der letzte Teil der Bestandsaufnahme definiert das Entwicklungsziel. Die Bestandsaufnahme definiert den Status-Quo-Zustand der Situation. Anhand von Gesprächen mit den Beteiligten und Betroffenen, sowie Interessensvertretern soll die Zielvorstellung entwickelt werden, wodurch das Defizit im Vergleich zur IST-Situation deutlich wird. Dieser Prozess soll auch dazu führen, dass eine Sensibilisierung stattfindet, da nur durch das aktive Gespräch mit den Interessensvertretern die Problemanalyse und die Zielvorstellungen der Betroffenen zusammengetragen werden kann.

Sind nun die Risikobereiche identifiziert worden wird anhand dessen in Kombination mit den Rahmenbedingungen und ökologischen Entwicklungszielen, das Schutzziel und akzeptable Restrisiko definiert, um sämtliche Erfassungsaufgaben zu lösen. Die tatsächlich optimale Lösung lässt sich logischerweise nur dann finden, wenn sie auch erfasst worden ist. Dementsprechend wird das Denken in Alternativen unter Beteiligung der Öffentlichkeit zwingende Voraussetzung für die Erstellung von effizienten Maßnahmenkonzepten.

Optionale hydraulische Gefährdungsanalyse

Die hydraulische Gefährdungsanalyse kann sich durch verschieden aufwändige methodische Ansätze ergeben. Die Gemeinde steht nun vor der Frage, wie detailliert die Betrachtung durchgeführt werden soll. Neben den in den Außengebietsentwässerungsplänen etablierten hydraulischen Berechnungen und der zur Verfügung gestellten nationalen Starkregenkarte können rein topografische Untersuchungen von Fließwegen und Senken auf Basis der zur Verfügung gestellten hochaufgelösten digitalen Geländemodellen erfolgen.

Alternativensuche & Wirkungsprognose

Durch eine Alternativensuche gefolgt von einer Wirkungsprognose, soll nun nach den geeignetsten Verbesserungen der Starkregenisikosituation gesucht werden. In diesem Schritt sollen nun sämtliche erdenkliche Alternativen aufgelistet werden. Diese Liste soll dann anhand von Expertenwissen und Entscheidungshilfen, argumentativ und transparent reduziert werden. In diesem Schritt geht es um einen im nachhaltigen Fließgewässermanagement sehr wichtigen, jedoch in Luxemburg noch sehr wenig angewandten Prozess, dem Auflisten von allen Alternativen und dem Herausfiltern der zielführendsten Maßnahmenkombination. Wie in folgenden Kapiteln noch detailliert erklärt wird, sollen hier Grundprinzipien der Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Sozialverträglichkeit Einzug in die Konzepte erhalten und Ideen auf diese Prinzipien geprüft werden.

Bei der Entwicklung der besten Maßnahmenkombination müssen die ortsspezifischen Randbedingungen beachtet werden. Eine grobe hydraulische und ökologische Wirkungsanalyse soll letztendlich eine langfristig zielführende und akzeptierte Lösung der Starkregenproblematik geben. Einfache und verständliche/transparenente Entscheidungshilfen sollen die langfristig zielführendste Maßnahmenkombination validieren (siehe Kapitel Entscheidungshilfen). Neben den physischen Wirkungsweisen der Maßnahmen (Reduzierung des Abflusses) müssen auch, darauf aufbauend, ökonomische und ökologische Folgewirkungen

(z.B. Folgeschäden an Infrastruktur durch Überlauf, Unterhaltungskosten oder an Ökosystemen durch Zerstörung von Habitat) abgeschätzt werden. Es erfolgt die Reduktion auf die besten (zielführendste) Maßnahmenkombination.

Entscheidungshilfen

Durch diese Herangehensweise entsteht die Herausforderung, unter Unsicherheit die optimalste Maßnahme zur Starkregenrisikominimierung zu wählen. Zudem gibt es die oben genannten rechtlichen Rahmenbedingungen zu ökologischen Anforderungen sowie dem Verbot einer Verschlechterung der Hochwassersituation bzw. den Anforderungen aus dem Code civil. Angesichts dessen stehen die Entscheidungsträger bei der Auswahl der Maßnahmen vor vielen Fragen:

- Welche Maßnahme ist ökonomisch und ökologisch am verträglichsten?
- Welche Maßnahmenkombination ist am zielführendsten?
- Mit welcher Priorität sind diese Maßnahmen umzusetzen?

Für eine detaillierte Analyse dieser Fragen stehen den Gemeinden jedoch oft nicht die zeitlichen, finanziellen und personellen Ressourcen zur Verfügung. Daher soll mit geringem Aufwand und mit den zur Verfügung stehenden Informationen und Daten eine transparente (Unsicherheiten in den Daten werden dabei offengelegt) Entscheidungsgrundlage geschaffen werden.

Um diese komplizierte und komplexe interdisziplinäre Untersuchungen zu vereinfachen, kann man sich der zweckmäßigen und vorübergehenden Vereinfachung bedienen. Einfache Entscheidungshilfen helfen vorläufig, sich auf für

wichtig erklärte Parameter zu beschränken. So muss zum Beispiel immer untersucht werden, ob die Kombination aus Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos auch ökologisch die beste Variante (zumindest keine Verschlechterung) darstellt. Auch wenn dies auf den ersten Blick schwierig erscheint, gibt es Hilfsdokumente um die Auswirkungen anzunehmen⁴. Weiterhin übersteigen die Unsicherheiten der negativen Auswirkungen durch den Klimawandel wahrscheinlich unsere bisherigen Routinen, Bemessungsgrundlagen und Planungsarten, so dass eine grundsätzliche Stärkung der ökologischen Widerstandskraft eines Flusssystems notwendig wird. Es empfiehlt sich daher immer ausreichend ökologische Mitigationsmaßnahmen (d.h. Maßnahmen um potentielle negative Auswirkungen gezielt abzuschwächen), im Hinblick auf ausreichend Klimawandelresilienz, in die Planung mit einzubeziehen.

So kann zum Beispiel eine simple Matrix mit drei Farben dabei helfen das Schutzpotential den ökologischen Auswirkungen gegenüberzustellen und die Maßnahmenmöglichkeiten dementsprechend zu visualisieren und zu bewerten. Im grünen Bereich befinden wir uns bei den Win-Win oder No-Regret Maßnahmen. Im gelben Bereich wären auf den negativen Impact zugeschnittene Mitigationsmaßnahmen vorzusehen. Maßnahmen im roten Bereich sind nicht zulässig. Es können jedoch Ausnahmen erlaubt werden. In dem Fall muss die Analyse ergeben, dass dies die einzige Möglichkeit zum Schutz ist, das Risiko zu hoch ist und nicht hingenommen werden kann und eine Kosten-Nutzen-Analyse eindeutig effizient ausfällt. In dem Falle müssten zudem sämtliche möglichen Mitigationsmaßnahmen getroffen werden.

„PLANUNG, DIE SICH IHRER GRENZEN BEWUSST IST, DAS NICHT-PLANBARE ALS EINE STRUKTURELLE GEGEBENHEIT AKZEPTIERT UND DEMENTSPRECHEND NACH EINEM ANDEREN UMGANG DAMIT SUCHT“
(Böhle, Pfeiffer, & Sevsay-Tegethoff, 2004)

⁴ Siehe hierzu (CIS working group ECOSTAT, 2020; JASPERS Networking and Competence Centre, 2018)

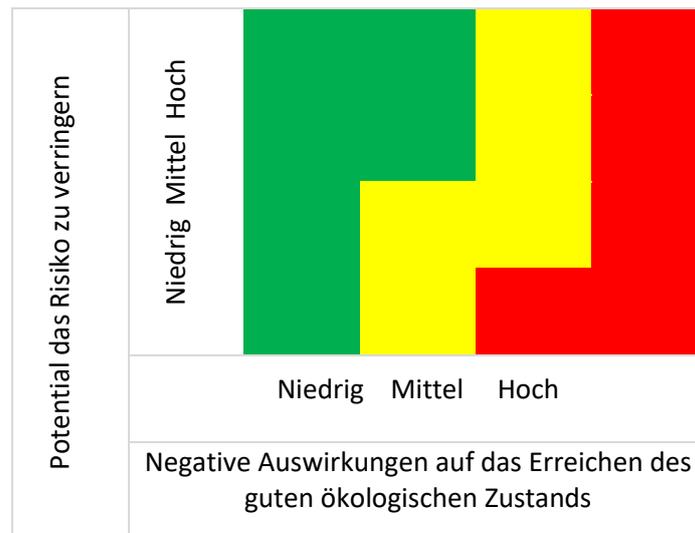


Abbildung 15: Beispiel einer vereinfachten Entscheidungsmatrix

Maßnahmenkonzept

“ES IST NICHT GENUG ZU WISSEN, MAN MUSS AUCH ANWENDEN; ES IST NICHT GENUG ZU WOLLEN, MAN MUSS AUCH TUN.“ (JOHANN WOLFGANG VON GOETHE)

Anhand der resultierenden Maßnahmenkombination mit transparenten und nachvollziehbaren Ergebnissen profitiert nicht nur der Planungsträger durch eine priorisierte Umsetzungsstrategie zum Erreichen der Schutzziele, sondern auch das für das Erarbeiten von Stellungnahmen zu Maßnahmensubventionierungsanträgen und

genehmigungsrechtlicher Bestimmungen verantwortliche Wasserwirtschaftsamt. Neben der Gewährleistung der Überprüfungsmöglichkeit und der Hilfe bei planungsrechtlichen Abwägungen bis zum Vorsorgeprinzip sollte die Erstellung von integralen Starkregenerisikomanagementkonzepten zu einer Verbesserung der Umsetzungsfähigkeit führen. Trotz all diesen Vorzügen, sowie Förderungen bis zu 100%, findet eine solche Konzepterstellung derzeit nur zögerlich Eingang in die luxemburgische Praxis und Starkregenerisikomanagement wird oft nur kurzfristig auf „Krisenbasis“ angegangen.

Priorisierung der Umsetzung

Damit auch die Umsetzung der im Rahmen des kommunalen Starkregenkonzeptes entwickelten Maßnahmenliste zielgerichtet verläuft, erfordert das Konzept eine geeignete **zeitliche Priorisierung**. Sie soll den Aufwand für die Umsetzung der Maßnahmen dem Nutzen gegenüberstellen. Die Gemeinden können hierdurch transparent abwägen, welche Maßnahmen warum priorisiert werden und gegebenenfalls dementsprechend in den Haushaltsplanungen vorsehen. Zudem empfiehlt sich zusätzlich zu den entwickelten Maßnahmen „Sofortmaßnahmen“ vorzusehen, die zum Beispiel im Rahmen einer Ortsbegehung mit dem Wasserwirtschaftsamt identifiziert wurden. Auch wenn der Aufwand sich oft nur sehr ungenau beziffern lässt, hilft es schon sehr, mit einer Annahme in zum Beispiel 3 Klassen zu kategorisieren (z.B. von „in kurzer Zeit erledigt“ – Klasse 1 bis „sehr hoher Aufwand“ – Klasse 3). Weiterhin könnte auch eine Nutzen-Aufwand-Matrix (siehe Abbildung 15) erstellt werden. Dem Einfallsreichtum sind keine Grenzen gesetzt und weitere Kriterien die zur Priorisierung dienen könnten, könnten unter anderem folgende sein:

- Wirksamkeit
- Kosten
- Umsetzungsaufwand
- Wartungsaufwand
- Ökologische Aspekte

- Gestalterische Aspekte (bzw. Raum- und Landschaftsplanerische Aspekte)
- Flächenverfügbarkeit

Hier ist wichtig zu verstehen, dass auch die Integration nicht unendlich fortgeführt werden kann und nicht alles mit allem verglichen und in Relation gesetzt werden kann. Es ist jedoch wichtig, die Entscheidungsprozesse anhand dieser einfachen, bildlichen Darstellung transparent darzulegen. Die Kriterien hängen von den Prioritäten der Gemeindeverwaltung ab und sollten mit dem Wasserwirtschaftsamt (bzw. den Wasser- und Risikomanagementplänen) abgestimmt sein.

„Safe development paradox“ oder der „Levee effect“

Nach der Umsetzung von Maßnahmen besteht die Gefahr, dass sich in der anliegenden Bevölkerung ein „*falsches Schutzgefühl*“ einsetzt. Auch „*safe-development paradox*“ oder „*levee effect*“ genannt, beschreibt das Phänomen, dass die Anwesenheit von strukturellen Schutzmaßnahmen die Ausdehnung von Siedlungs- und Industriegebieten in Risikogebieten fördert und dies zu katastrophalen Folgen führen kann, wenn ein Ereignis eintritt, das durch eine Wiederkehrperiode gekennzeichnet ist, die höher ist als der Bemessungswert auf die die strukturelle Schutzmaßnahme dimensioniert wurde (Ridolfi, et al., 2019).

Um dem entgegenzuwirken, müssen, nach der Umsetzung der Maßnahmen, weiterhin folgende Prinzipien gewährleistet werden:

- Neue Risiken sollen vermieden werden, z.B. soll die Schaffung neuer Expositionen vermieden werden;
- Instandhaltungs- und Pflegekonzepte für umgesetzte Maßnahmen müssen respektiert werden, Zuständigkeiten müssen klar definiert werden;
- Existierende Risiken sollen weiterhin reduziert werden;
- Die Widerstandskraft soll weiterhin gestärkt werden.

Die Bemühung zur Sensibilisierung vor Gefahrensituationen muss weiterhin aufrecht gehalten werden. Die Seltenheit und Unvorhersehbarkeit, sowie ihre potentiell großen Auswirkungen stellen hohe Anforderungen an den Kommunikationsaufwand.

Gleichermaßen muss auch immer klargestellt werden, dass das Schutzniveau nie 100% erreichen wird, dass es trotz allen Maßnahmen noch zu Überschwemmungen kommen kann und, dass das Schutzniveau nur wenig durch oft sehr teure Maßnahmen gesteigert werden könnte.

Diese Kommunikationsaufgabe ist ohne Fertigstellung fortwährend. Sie bedarf eines wiederkehrenden zyklischen Aufwands um die Erinnerung, zum Beispiel durch Informationsmaterial, an vergangene Ereignisse und die Sensibilisierung für die bestehende Gefahrensituation stets aufrecht zu erhalten.

Förderungen

Grundsätzlich kann die Erarbeitung eines integralen kommunalen Starkregenrisikomanagementkonzepts durch ein Ingenieurbüro bis zu 100% vom Staat über den „Fonds pour la gestion de l'eau“ gefördert werden. Die hieraus herausgehenden Maßnahmen sind bis zu 90% subventionierbar, wobei Objektschutz gedeckelt zu 75% gefördert wird.

Hierbei gilt immer das Grundprinzip einer möglichst zielführenden Förderung⁵. Aus der EU-Wasserrahmenrichtlinie, Richtlinien zu Biotopschutz, Erneuerbare Energien oder gemeinsame Agrarpolitik ergeben sich natürliche Spannungsfelder. Das heißt, wenn sämtliche Spannungsfelder in die Konzepte eingearbeitet und die Maßnahmen daraufhin evaluiert wurden, werden die herausgearbeiteten Maßnahmen mit dem höchstmöglichen Prozentsatz subventioniert. Dies um zu gewährleisten, dass die, an die wasserrahmenrechtliche Gesetzgebung gebundenen, hydromorphologischen Anforderungen zur Verbesserung der Fließgewässerqualität, (Erreichen des guten ökologischen Zustands, Verschlechterungsverbot, Verursacherprinzip) respektiert werden.

Folgende Leitlinien sollen hierbei stets evaluiert werden⁶ :

- Passive (nicht-bauliche) Maßnahmen vor aktiven (baulichen) Maßnahmen
- Maßnahmen im Einzugsgebiet vor Maßnahmen entlang/im Gewässer
- Natürliche Retention vor linearen, strukturellen Maßnahmen
- Natürliche/ökologische Baumethoden vor technischem Bau

Es bleibt zu beachten, dass es eine der zentralen Aufgaben der Wasserverwaltung ist den Ausgleich zwischen Nutzungsansprüchen, Nachfragen und dem langfristigen Dargebot der Ressource Wasser sicherzustellen. Dieses Ziel muss natürlich auch unter Berücksichtigung von Klimawandel und Landnutzungsänderungen erreicht werden können. So sind zum derzeitigen Stand (Oktober 2022) in sieben Gemeinden die Konzepte abgeschlossen und die Maßnahmen in Umsetzung und in 26 Gemeinden werden derzeit Starkregenrisikomanagementkonzepte erstellt. Viele weitere Gemeinden sind zudem in der Beauftragungsphase zum Erstellen von Starkregenrisikomanagementkonzepten.

⁵Siehe hierzu (Neuhold, 2016)

⁶ in Anlehnung an (Ministerium für ein lebenswertes Österreich, 2017)

4.3.2 Handlungsfelder und Maßnahmen zur Prävention

Das folgende Kapitel soll eine Übersicht der Handlungsfelder geben, die auf kommunaler und privater Ebene dafür geeignet sind, dem möglichen Schadenspotential bei Starkregenereignissen vorzubeugen oder diese möglichst gering zu halten. Da ein Maßnahmenkatalog schnell überarbeitet ist und nie komplett aufgelistet werden kann, wurde hier absichtlich davon abgesehen eine Auflistung aller möglichen Maßnahmen gegen Starkregenrisiko zu erstellen. Ziel ist es eine Übersicht der Handlungsfelder und des Handlungsspielraums zu bekommen, da Wert daraufgelegt wird, einen möglichst großen Bereich an Maßnahmen abzudecken.

Die Vorsorge wird erzielt durch vorab durchgeführte, vorbeugende Maßnahmen mit denen eine negative Entwicklung oder spätere Notlage vermieden werden soll.

Die Schutzmaßnahmen erfolgen auf Basis von Projektierung und umfassen neben Schutz bis zu einer bestimmten Wassermenge auch die Vorkehrungen gegen Restrisiko sowie die Instandhaltung und Pflege. Für alle Schutzmaßnahmen gelten strenge, der Nachhaltigkeit verpflichtete und oben beschriebene Grundsätze.

„Bei No-Regret- Maßnahmen übersteigt bereits unter den heutigen Klimabedingungen der zu erwartende Nutzen die anfallenden Kosten der Maßnahme. Sie werden vorsorglich ergriffen, um negative Auswirkungen zu vermeiden. Ihr Nutzen für die Gesellschaft ist auch dann noch gegeben, wenn der eigentliche Grund für die ergriffene Maßnahme nicht im erwarteten Ausmaß zum Tragen kommt.“ (Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 2013)

Bauliche Maßnahmen

Strukturelle Maßnahmen betreffen Schutzbauten. Wenn Menschen und Sachwerte geschützt werden müssen werden technische Lösungen beispielsweise in Form von Leitdämmen, Rückhaltebecken und Einlaufbauwerken oft schnell gefordert. Diese Möglichkeiten sind jedoch beschränkt und die gewonnene Sicherheit nur relativ. Es können immer stärkere Starkregenereignisse auftreten als in der Planung angenommen. Es ist jedoch zu bemerken, dass der Blick auf die Kosten-Nutzen-Effizienz nicht verloren gehen darf und, dass diese teilweise doch sehr erheblichen Eingriffe in die Natur mit den Gesetzgebungen zur ländlichen Entwicklung, Naturschutz und Gewässerschutz im Einklang stehen müssen.

Außengebietsentwässerung

In einem integralen Starkregenrisikomanagementkonzept muss der Zustand der kommunalen Außengebietsentwässerung erfasst und gekennzeichnet werden. Dies wurde ebenfalls im Rahmen des „Dossier technique d’assainissement“ anvisiert. Viele Gemeinden haben bereits einige der hier identifizierten Maßnahmen umgesetzt. Nach Starkregenereignissen wird oft lediglich an den Problemstellen nachgearbeitet. Jedoch sollte auch hier durch die Kleinräumigkeit und Unvorhersehbarkeit der Starkregenereignisse die Verhältnismäßigkeit gewahrt werden und eine möglichst vorsorgliche Herangehensweise an den Tag gelegt werden (siehe Kapitel 4.2.1). Potentiellen Problemstellen sollten sicherheitshalber auf Defizite untersucht werden und gegebenenfalls adaptiert werden. Jedoch heißt dies nicht, dass in der allgemeinen Außengebietsentwässerung jetzt jedes Starkregenereignis schadlos abgeführt werden muss. Nichtsdestotrotz ist das, im Managementkonzept erarbeitete Optimum überall zu gewährleisten und so spielt die Analyse der Außengebietsentwässerung eine nicht unwesentliche Rolle in einem integralen Konzept.

Abfanggräben, Verwallungen, Leitdämme

Als Teil der Außengebietsentwässerung, leiten Abfanggräben, Verwallungen und Leitdämme Außengebietswasser gezielt um das Siedlungsgebiet in unkritische Bereiche. Diese Maßnahme fördert den Rückhalt, und verzögert durch Umleitungen die innerstädtische Wassereinleitung, und fördert hiermit Versickerung und Verdunstung. Während der Wirkungsgrad solcher Maßnahmen sich als hoch bewährt hat, sind diese Maßnahmen jedoch auch wartungsintensiv. Synergien können sich ergeben, wenn die Maßnahmen naturnah angelegt werden und somit einen zusätzlichen Beitrag zur Förderung von Biodiversität mit sich bringen. Spannungsfelder können entstehen bei Landnutzungskonflikten mit Landwirten oder nicht schadensfreier Umleitung des Wassers. Die Dimensionierung und das daraus einhergehende Schutzziel und Restrisiko kennzeichnen Schutzmaßnahmen gegen Starkregen gegenüber Maßnahmen aus der Außengebietsentwässerung.

WIRD EINE STRUKTURELLE MAßNAHME ZUM BEISPIEL AUF EIN WIEDERKEHRINTERVALL VON 100 JAHREN BEMESSEN. SO BESTEHT IN EINEM JAHR EINE 1% CHANCE, DASS DAS EREIGNIS ÜBERSCHRITTEN WIRD. INNERHALB EINES ZEITRAUMS VON 30 JAHREN OHNE 100JÄHRIGES EREIGNIS LIEGT DIE ÜBERSCHREITUNGSWAHRSCHEINLICHKEIT IM JAHR BEI ~26%.

Rückhaltebecken

Mit künstlich angelegten Rückhaltebecken soll das bei Regen anfallende Außengebietswasser kurzfristig gespeichert und gezielt vom Siedlungsgebiet ferngehalten werden. Der Wirkungsgrad ist bis zur Ausbauwassermenge sehr hoch. Regenrückhaltebecken benötigen jedoch je nach Ausführung viel Wartungsaufwand und sind in der Dimensionierung auf Starkregen ökologisch fragwürdig. Synergien können nur mit einer sehr naturnahen Anlegung und gleichzeitigen Förderung von Biodiversität erreicht werden. Konfliktpotential gibt es bei Überschreitung der Ausbauwassermenge und technischem Eingriff in die Natur und Landschaft. Zudem ist die Problemstellung der Definierung des Schutzziels, der Ausbauwassermenge und des Restrisikos in Verbindung mit dem „Safe development paradox“ oder der „Levee effect“ (siehe Kapitel S. 26) mit Bedacht zu lösen.

Einlaufbauwerke



Abbildung 16: Einlaufbauwerk in Seltz, 2020. Service Regional Nord – EEPI, 2020

Um an Engstellen (Verdolungen, Verrohrungen, eingefassten und überbauten Fließwegen) Rückstau durch Verstopfung und Verklausungen zu verhindern, können Einlaufbauwerke eine schadensfreie Ableitung des Regenwassers gewährleisten. Rechenysteme verhindern ein schnelles Zusetzen des Durchlaufbauwerks und verhindern somit im Ernstfall den Rückstau und schädliches Umströmen/Überschwemmen. Die Dimensionierung der Rechen ist jedoch genau zu planen und umzusetzen. Diese Einlaufbauwerke mit oder ohne Schlamm- und Geröllfang müssen solide ausgeführt sein und von mehreren Seiten, am besten mit Überstauschutz, einströmbar sein. Man spricht hier von einem „dreidimensionalen Rechen“.

Maßnahmen im Kanalnetz

Eine Analyse des Regenwassermanagements und der Siedlungswasserwirtschaft gehört ebenfalls zum Starkregenerisikomanagement. In spezifischen Fällen können Kanalnetze das Schadenspotential räumlich verlegen. Weiterhin gibt es auch Studien, die gezeigt

haben, dass der gleichzeitig einsetzende Drosselabfluss sowie das Erreichen der Ausbauwassermenge und Einsetzen des Überlaufens, die Gefahrenherde zeitgleich, schlagartig erhöhen können. Es muss stets im Hinterkopf behalten werden, dass die Kapazitätsgrenzen und Ausbauwassermengen erreicht werden können und, dass sämtliche strukturellen Maßnahmen eine Dimensionierung haben. Die Wahrscheinlichkeit, wie oft diese Kapazitätsgrenze erreicht werden könnte, kann (z.B. mit Hilfe von LuxBeRe) ermittelt werden.

Notfallkanäle

Um gezielte Entlastungspunkte zu schaffen, können Notfallkanäle für Regenwasser durch zusätzliches Kanalvolumen den Kanalabfluss erhöhen. Sind diese Bauwerke bis zur Ausbauwassermenge sehr wirksam, ist die Kosten-Nutzen-Effizienz solcher Maßnahmen durch aufwändige Umsetzung meistens nicht wirtschaftlich. Zudem ist die Umsetzbarkeit oft durch verschiedene infrastrukturelle Rahmenbedingungen im Großteil der Fälle nicht gegeben.

Entflechtungsmaßnahmen

Oft gibt es, durch die historische Entwicklung der Infrastruktur ungünstige Einleitungen und verflochtene Kanalnetzsysteme. Durch eine Entflechtung und Abkopplung von Flächen, die ungünstiger Weise an das kommunale Kanalnetz angeschlossen sind, können stellenweise Einleitungen vermieden, begrenzt oder verzögert werden. Dementsprechend hat diese Abkopplung einen positiven Effekt auf die hydraulische Leistungsfähigkeit des restlichen Systems.

Beseitigung hydraulischer Defizite

Um die Abflusskapazität von Kanalsystemen stets auf der Höhe der ursprünglichen Bemessung zu halten und frühzeitigen Kanalrückstau zu vermeiden, kann bei Problemen eine Analyse des Kanalsystems hydraulische Defizite identifizieren. Außerdem ist eine regelmäßige Kontrolle der Kanäle wichtig um durch Beseitigung von Abflusshindernissen die hydraulische Leistungsfähigkeit stets aufrecht zu erhalten.

Maßnahmen im Straßennetz

Auch im Straßennetz können Maßnahmen umgesetzt werden. Auch hier wird der Querschnittscharakter der Starkregenproblematik deutlich - ein transdisziplinärer Ansatz im Einbezug aller Verwaltungen ist notwendig um an allen Stellschrauben das Risikopotential zu reduzieren.

Anpassung Bordsteinhöhe

Diese Maßnahme nutzt den Straßenraum als Retentionsfläche. Hauptsächlich in flachem Terrain umsetzbar, kann im Straßenraum mit einer gewissen Bordsteinhöhe und einem umgedrehten Dachprofil ein großes Retentionsvolumen erzielt werden. Bei solcher multifunktionaleren Planung müssen jedoch immer sämtliche Aspekte beachtet werden, so könnte die Umsetzung dieser Maßnahme z.B. die Barrierefreiheit einschränken.

Notwasserwege

Es gibt Stellen an denen, durch verschiedene Rahmenbedingungen, ein Wasserrückhalt nicht mehr möglich ist, bzw. die Bemessung nicht mehr ausreicht um die Wassermassen im Extremfall schadensfrei aufzufangen und zeitverzögert abzuführen. In diesen Fällen kann eine Straße, die schadlose Ableitung mit Lenkelement und erhöhten Bordsteinen im Notfall als Notentlastungsweg gewährleisten (Ahlhelm, et al., 2016).

Versickerungsfähige Materialien

Vor allem auf Parkflächen, sollten zur Erhöhung der Infiltration, versickerungsfähige Bodenbeläge Verwendung finden. Zum einen kann so der Oberflächenabfluss und die Einleitung von Regenwasser reduziert werden. Zum anderen verringern solche Maßnahmen den Versiegelungsgrad und erhöhen damit die Grundwasserneubildung. Siehe auch Flächenentsiegelung.



Abbildung 17: Beispiel für Notwasserwegeplanung. Quelle: (MDDI; Département de l'aménagement du territoire, 2012)

Optimierung Straßeneinläufe

Sind wir nicht im Falle, dass wir das Oberflächenwasser im Straßenraum zwischenspeichern wollen, können Straßeneinläufe optimiert werden, d.h. die Leistungsfähigkeit wird erhöht, damit auch bei starkem Niederschlag und der dementsprechende Oberflächenabfluss schnellstmöglich in die Kanalisation geleitet wird. In dem Fall muss natürlich die hydraulische Auslastung der Kanalisation geprüft werden (sonst kommt das Wasser woanders wieder aus dem Kanaldeckel).

Flächenentsiegelung

Um Überschwemmungen und deren Abflussspitzen zu verringern, können Flächenentsiegelungen dabei helfen durch Erhöhung der Versickerung den Abfluss zu verringern. Hierbei werden wasserdichte Beläge durch wasserdurchlässige Materialien ersetzt. Je nach Flächennutzung können begrünte (z.B. Rasengittersteine) wie auch unbegrünte (z.B. Kies- und Splittdecken) die wasserdichten Beläge ersetzen. Weiterhin kann diese Maßnahme auch als Rückbau (von z.B. Überdachungen von Parkplätzen) oder bei nicht mehr benutzter wasserundurchlässiger Flächen vorgesehen werden.

Nicht-bauliche Maßnahmen

Wie in Kapitel zum „Safe development paradox“ oder der „Levee effect“ im Detail beschrieben, können bauliche Maßnahmen, das Starkregenrisiko nie ganz und immer nur bis zu einer begrenzten Ausbauwassermenge abfangen. Nichtsdestotrotz haben sie aufgrund ihrer physischen Präsenz das Potenzial, ein falsches

Sicherheitsgefühl zu erzeugen, was zu einer unangemessenen Landnutzung in den Schutzgebieten führen kann. Nicht-bauliche Maßnahmen umfassen die Maßnahmen die zu einer Verminderung der Abflussspitzen und der Abflussgeschwindigkeit führen und spielen eine wichtige Rolle bei der Verringerung der negativen Auswirkungen auf die Umwelt. Durch ihre begrenzten negativen Umweltfolgen, auch „No-Regret“ und „Win-win“-Maßnahmen genannt, müssen nicht-bauliche Maßnahmen, speziell beim Starkregenerisikomanagement aktiv als praktikable Optionen (sowohl als unabhängige als auch als ergänzende, siehe Maßnahmenkombinationen) in Betracht gezogen werden.

Gewässergestaltung

Im Zusammenhang mit den zusätzlichen Anforderungen aus der Wasserrahmenrichtlinie liegt der Fokus außerhalb von Siedlungsgebieten auf einer fließgewässertyp-spezifischen Gewässergestaltung. Die Wiederherstellung des naturnahen Lebensraums aus den kultivierten und genutzten, durch Menschen geschädigten Flussökosysteme, sorgen auch immer für einen verlangsamten Abfluss und somit zu einer geringeren Gefahr durch Sturzfluten. Durch die über Jahrzehnte überprägte Kulturlandschaft in Kombination mit kulturwirtschaftlichem Wasserbau wurde der ursprüngliche Wasserkreislauf stark gestört. Durch die zumindest teilweise Behebung der Schädigungen wie Ufer- und Sohlbefestigungen wird die Abflussgeschwindigkeit verringert. Eine zusätzliche Uferbegrünung bietet Erosionsschutz. Retentionsflächen und naturnahe Auengebiete bieten dem über die Ufer tretendem Wasser schadfreie Ausbreitungsmöglichkeit, dienen so als Zwischenspeicher und verringern Abflussmenge und Fließgeschwindigkeit.

Ein wichtiger Punkt ist hier jedoch auch die *schadfreie* Ausbreitungsmöglichkeit. Stege oder Zäune, sowie landwirtschaftliches Material (z.B. Heuballen, Holzlager oder Tränken) sollten möglichst fern des Gewässers sein um einen schadlosen und ungestörten Abfluss zu gewährleisten. Innerhalb von Siedlungsgebieten, muss der schwierige Kompromiss zwischen hydraulischer Leistungsfähigkeit und Eingriffen in das Ökosystem gefunden werden.

Maßnahmen in der Landwirtschaft

In wassersensibler Landwirtschaft liegt viel Potential zur Risikominderung. Aufgrund ihrer Auswirkung auf die Nutzung des Bodens hat die Landwirtschaft einen entscheidenden Einfluss auf den Wasserabfluss. Je nach angewandter landwirtschaftlicher Praktik, kann die Landwirtschaft das Phänomen der Sturzflut verschlimmern oder auch deutlich verringern. Durch intensive landwirtschaftliche Praktiken kann es in den Außenbereichen der Gemeinden bei Starkregen zu starkem Bodenabtrag, Verschlammung, Überschreitung der Infiltrationskapazität kommen und verursacht dadurch starken und schnellen Oberflächenabfluss. Im Zusammenhang mit starken Erosionsprozessen können diese Boden-Wasser-Massen (Schlammlawinen) verheerenden Schaden anrichten. Oft ist nicht das Wasser der zerstörerischste Faktor, sondern ein Großteil des Schadens ist auf die mitgeführten Sedimente bzw. Schlamm zurückzuführen. Zudem werden auch bauliche Maßnahmen auf eine Ausbauwassermenge dimensioniert. Hierbei fließen in der Regel jedoch keine Überlegungen zur Verringerung der Ausbauwassermenge im Zusammenhang mit Erosion und Bodenablagerungen während des Starkregenereignisses mit ein.

So sollte bei der Bestandsaufnahme bei vergangenen oder sich wiederholenden Ereignissen auch der Bodenabtrag berücksichtigt werden und die Bewirtschaftung analysiert werden.

Ackerrandstreifen & Gewässerrandstreifen

Ackerrandstreifen, Grünstreifen oder Erosionsschutzstreifen sind begrünte Streifen von wenigen Metern entlang von Äckern. Ergänzend mit Sträuchern oder Bäumen bepflanzt oder als langjähriges Grünland oder kurzjähriger Grasstreifen werden diese riegelartigen Streifen quer zum Gefälle angelegt. Beregnungsversuche mit $70\text{m}^2/\text{l}$ zeigten bei einem 12m breiten Randstreifen einen Rückhalt von 99% des Bodens. Weiterhin versickerte 20% des zufließenden Wassers in den Randstreifen (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, 2018).

Begrünung bzw. Brachlegung entlang von Fließgewässern umfasst das dauerhafte Ende der Ackernutzung entlang von Bächen und Flüssen. Diese **Gewässerrandstreifen** schützen nicht nur vor Erosion, sondern halten auch Stoffeinträge zurück und bieten dem Gewässer einen Schutzsaum. Beregnungsversuche mit $85\text{l}/\text{m}^2$ ergaben hier, einen nahezu 100%igen Bodenrückhalt und eine Reduktion vom Wasserabfluss um 20% verglichen mit einem Sonnenblumenfeld (WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, 2018).

Anbaumethoden

Bei konventionellem Maisanbau ist der Bestandesschluss (der Zustand in dem die Pflanzen in gegenseitigem Kontakt stehen und so den Boden komplett bedecken) in der kritischen Starkregenphase (im Frühjahr und Sommer) nicht erreicht. Dies führt dazu, dass bei Starkregen, der Tropfenschlag direkt auf die nackte Bodenoberfläche fällt, und hier die Bodenaggregate mechanisch zerkleinert. Die gelösten Teile sedimentieren dann wieder ab. Als Folge hat man eine Einebnung, welche zu einer Beschleunigung des Oberflächenabflusses führen kann und einen Verschluss der Bodenporen. Dies trägt zur Verminderung der Infiltrationskapazität bei, welche im Folgeschluss wieder eine Erhöhung des Oberflächenabflusses generiert. Eine Maßnahme der landwirtschaftlichen Anbaumethoden kann zum Beispiel die **Engsaat** sein. Diese landwirtschaftliche Maßnahme zeichnet sich durch eine 2 bis 3 Wochen früheren Bestandesschluss aus. Demzufolge wird die kritische Phase von Starkregen im Zusammenhang mit Verschlammung verringert. Folglich werden Erosion und Abfluss verringert. Modellrechnungen zufolge können bei $39\text{l}/\text{m}^2$ bei einer Engsaat Mitte Juni mit einer Reduktion von Bodenabtrag um 14% und des Wasserabflusses um 8% gerechnet werden (WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, 2018).

Eine weitere Maßnahme ist die **Mulchsaat**, bei der die Hauptfrucht in die Erntereste der Vorfrucht eingesät wird, bei der die Wirkung auch auf der Dämpfung der Verschlammung durch Starkregentropfen beruht. Bei $65\text{l}/\text{m}^2$ Regenversuchen flossen hier je nach Bodenart bis zu 80% weniger Boden und bis zu 40% weniger (gegenüber konventioneller Pflugbewirtschaftung) Wasser ab (WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, 2018).

Anbauplanung

Neben den Anbaumethoden, können auch in der Planung schon vorsorglich abflussmindernde Maßnahmen getroffen werden. So kann zum Beispiel eine **Hangteilung** (möglichst in Kombination mit einer Querbewirtschaftung), durch die veränderte Anbauordnung von erosions- und abflussgefährdeter Kulturen wie Mais und Zuckerrüben am Gesamthang, eine große Wirkung erzielen. Die Aufteilung eines Schrages am Hang in mindestens zwei Teilparzellen verspricht bereits positive Wirkung. Auch wenn schwer erfassbar, so wurde in Simulationen gezeigt, dass eine Hangteilung quer zum Hang ohne weitere Maßnahmen schon 10% des Abflusses reduzieren kann (WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, 2018). In den besonders kritischen Hotspots sind Kombinationen mit Ackerrandstreifen denkbar, die durch zusätzliche Abflussverminderung für Sturzfluten vorsorgen.

Als **Felderneuordnung** sollen, räumliche Konzentrierungen von erosionskritischen Kulturen rechtzeitig vermieden werden, die durch fehlende wassersensible Koordination entstehen können. Diese Maßnahme erfordert Diskussionsbereitschaft, Mediationsaufwand und Fachberatung, hat jedoch das große Potential einige der hydrologischen Ursachen von Sturzfluten mit einfachen Planungsmaßnahmen und anhand von koordinierenden Gesprächen zu beheben. Hier könnte die



Abbildung 18: Gewässerrandstreifen an der Helme, Sundhausen, 2018. Quelle: Planungsbüro Zumbroich



Abbildung 19: Hangteilung. Quelle: (WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, 2018)

Anbauplanung des Folgejahres im Einzugsgebiet zusammen besprochen werden und die Planung einer gleichmäßigen Verteilung von abflusskritischen Kulturen angepeilt werden (WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, 2018).

Faschinen

An topografischen sich konzentrierenden Stellen sind Faschinen eine ingenieurökologische Bauweise zur Reduzierung von Erosionsprozessen. Unter einer Faschine versteht man ein Bündel aus Ästen und Reisig, zum Beispiel aus Stockausschlägen. Diese Maßnahme kann nicht nur zum Boden- und Wasserrückhalt installiert werden, als Art des Lebendverbau sind sie auch zur Sicherung von rutschungsgefährdeten Hängen und zur Befestigung von Böschungen zielführend.

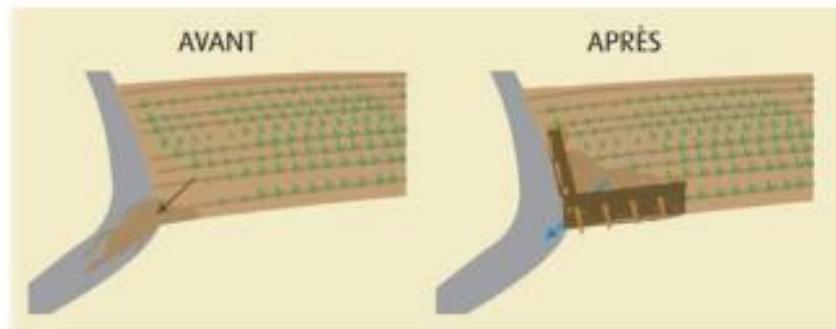


Abbildung 20: Funktionsweise einer Faschine (Quelle: seine-maritime.chambagri.fr)

Maßnahmen in der Forstwirtschaft

Ähnlich der Landwirtschaft hat auch die Forstwirtschaft einen erheblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt durch fast natürliche hydrologische Prozesse. So vermögen Waldbestände zum Beispiel durch ihr Wurzelsystem den Boden tiefgründig zu lockern und sorgen damit für hohe Infiltrations- und Retentionskapazitäten. Durch das dichte Kronendach im Wald ist die Interzeption sehr hoch. Verschlammung oder hortonischer Oberflächenabfluss sind im Wald keine Gefahr. Diese Schutzfunktion der Wälder in Bezug auf die Entstehung von Starkregen ist unter einem sich ändernden Klima und sich ändernder Landnutzung potenziell gefährdet. Der Wasserhaushalt von Waldökosystemen ist stark von Klima und Waldstruktur abhängig. Letztere wird durch die im Forstsektor angewandten Bewirtschaftungsmaßnahmen bestimmt, wie z.B. Auswahl der Baumarten, Bewirtschaftung der Bestandesstruktur und -dichte, Erntemethoden usw. So können durch Borkenkäfer gestorbene und später gefällte Kiefernwälder standortabhängig auch direkten Einfluss auf das Oberflächenabflussgeschehen haben. Dementsprechend folgen die Maßnahmen hier eher einer konservativen Herangehensweise, sprich fokussieren sich auf den Erhalt von Schutzfunktionen und der Stärkung der Widerstandskraft.

Vermeidung von Freiflächen

Durch Holzernte, Stürme oder Käferbefall, können größere Freiflächen entstehen. Diese Bereiche sind je nach Hangneigung besonders kritische Bereiche für die Sturzflutentstehung. Gegenüber geschlossenen Waldbeständen beträgt die Freifläche fast das Dreifache an Oberflächenabfluss bei. Durch **Förderung des Unterstands** vor der Holzernte können solche Freiflächen zeitnah wiederbewaldet werden.

Weiterhin wäre eine Karte denkbar die die Stellen ausweist an denen die Wirkung des zur Starkregenverminderung besonders hoch ist: siehe dienliche topografische und bodenphysikalische Gegebenheiten, auf denen die Freifläche besonders vermieden werden sollte bzw. die zeitnahe Wiederaufforstung besondere Wichtigkeit erfährt.

Bei jeder Rodung sollte daher immer eine „was-wäre-wenn-Starkregen“-Überlegungen gemacht werden um keine neuen Gefahrensituationen zu schaffen.

Etablierung von Mischwald

Mischwald ist im Gegenzug zu Reinbestand resilienter gegenüber Schädlinge und Klimawandel und stellt damit eine dauerhafte Bestockung, und die damit oben beschriebenen positiven Auswirkungen auf die Sturzflutentstehung, sicher. Bei der Umsetzung dieser Maßnahme könnte man sich vorstellen vorrangig, die Flächen zu priorisieren die eine besondere Schutzdienstleistung mit sich bringen und hier gezielt, zur Steigerung der Widerstandskraft und zum Schutz der Schutzfunktion, einen Mischbestand zu realisieren.

Waldwegeentwässerung anpassen

Je nach Situation kann das Wasser in die forstwirtschaftliche Fläche abgeleitet werden. So können gezielt Retentionsmulden im Wald geschaffen und/oder Retentionstümpel reaktiviert werden.

Dezentraler Wasserrückhalt

Mit dezentralem Regenwasserrückhalt wird der Oberflächenabfluss zeitlich verzögert und seine Fließgeschwindigkeit verringert. Hierbei sollen Flutmulden, Feldabflussspeicher und Kleinrückhaltebecken angelegt werden. Durch die wasserrahmenrechtlichen Einschränkungen des Verschlechterungsverbots im Zusammenhang mit dem allgemein mäßigen Zustand der luxemburgischen Oberflächenwasserkörper, empfiehlt es sich das Rückhaltevermögen von bestehenden Wegedurchlässen und Senken zu (re-)aktivieren. Weiterhin können frühere Lösch- und Fischteiche (oft versandet), in Abstimmung mit der AGE reaktiviert werden.

Bewusstseinsbildung, Sensibilisierung, Verhaltensvorsorge & Risikokommunikation

Trotz Umsetzung aller vorbeugenden und technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Starkregenerisikos: ein Restrisiko bleibt immer. Somit bedarf es der Verhaltensvorsorge durch Bewusstseinsbildung. Dementsprechend sollten bei Projektierungen neben Informationen zu Wasserausbaumenge und Instandhaltungsempfehlungen auch immer Empfehlungen zur Sensibilisierung zu Restrisiko und Verhaltensvorsorge vorgesehen werden.

Die Sensibilisierung und Information der betroffenen Bevölkerung bildet die Grundlage für eigenverantwortliches Handeln. Neben Presseinformationen, Informationsveranstaltungen, können auch Sprechstunden, Flyer oder Informationen auf der Gemeindehomepage zum Ziel führen.

Die Verhaltensvorsorge sind kleinere Maßnahmen wie die überflutungsangepasste Aufbewahrung im Keller und Aufsockelung von Waschmaschine oder Kühlschrank im überschwemmbareren Bereich bis hin zu aufwendigeren Maßnahmen wie die Hochlegung von Versorgungszentralen (Heizung, Strom, Telefon) um Kurzschlüsse zu vermeiden. All das sind jedoch Maßnahmen die auch nach Umsetzung von baulichen Maßnahmen immer noch Sinn ergeben, da jede bauliche Maßnahme auf eine Ausbauwassermenge begrenzt ist und trotzdem ein Ereignis stattfinden kann das diese Dimensionierung überschreitet. So gibt es hier die Möglichkeiten Checklisten zu entwickeln anhand derer Bürger*Innen in Haus- und Wohnung selbst Aspekte der starkregensicheren Lagerung und Wartung vorsorglich kontrollieren können.

Starkregenerisikomanagement braucht, ähnlich dem effektiven Hochwasserrisikomanagement, Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung. In diesem Kontext geht es hauptsächlich darum, die Interessenvertreter mit genug Informationen zu versorgen um sie damit auf ein Starkregenereignis durch Wissen vorzubereiten. Daher muss ein Wissenstransfer stattfinden. Es soll die Eigenverantwortung betont und durch Öffentlichkeitsarbeit und Information gestärkt werden. Lange Zeit galt die Ansicht, dass Experten aus Wissenschaft und Politik – im Gegensatz zur Bevölkerung als ahnungslosen Laien – allein über das Monopol von Wissen und Bildung verfügen würden um spezifische Krisen (oft auch den wasserbezogenen Gefahren) adäquat zu begegnen. Dieses altmodisch und hierarchisch geprägte Verständnis muss jedoch auch hier langsam abgelöst werden und so soll auch im Starkregenerisikomanagement die Idee, die Potentiale der Bevölkerung zu Nutzen und lokales Wissen in die Entwicklung der Starkregenerisikomanagementkonzepte mit einzubinden, Zuspruch finden.

Raumplanerische Vorsorge

Durch raumplanerische Vorsorge gilt es der Entstehung neuer Risikosituationen für Mensch und Material vorzubeugen. In sämtlichen Bereichen der Stadtentwicklung sollte klimawandelgerecht und wassersensibel gebaut werden. Es geht darum sogenannte „Schwammstädte“ zu entwickeln um die Pufferkapazität bei Starkregenereignissen mit Win-Win-Maßnahmen zu stärken.

Anpassung der Landschafts- und Bebauungsplanung

Durch wassersensible Bebauungsplanung soll so früh wie möglich die Flächennutzung einer potentiellen Überflutungsgefahr angepasst werden. Das bedeutet konkret in überschwemmungsgefährdeten Bereichen Nutzungen die ein hohes Schadenspotential hätten komplett zu vermeiden und stattdessen in diesen Flächen Nutzungen vorzusehen, die eventuell sogar die Überflutungsgefahr senken könnten. Ehemalige Retentionsräume sind wiederherzustellen, Flächennutzungen der Überflutungsgefahr anzupassen und Neuausweisungen von Nutzungen mit hohem Schadenspotential z.B. Bebauungen im Talweg sind komplett zu vermeiden. Weiterhin muss das Ziel eine nachhaltige Siedlungs- und Flächenentwicklung sein, in der die Flächeninanspruchnahme bzw. die Versiegelung möglichst reduziert wird. Eine hohe Gefährdung kann fälschlicherweise mit hohem Potential für Neubebauungen verbunden werden. Heute gibt es dort, wo unsere Vorfahren weise überflutungsgefährdete Bereiche gemieden haben, besonders viele Baulücken (Umweltbundesamt, 2018). Weiterhin besteht in Luxemburg, die zivile Verpflichtung des Oberlieggers, dass Veränderungen (Bebauungen) auf seinem Grundstück nicht zu einer Verschlechterung der Abflusssituation auf dem Grundstück des Unterlieggers führen dürfen (Ahlhelm, et al., 2016).

WIRD IN LUXEMBURG PRO WOCHE IN NUR EINER DER 102 GEMEINDEN EINE NEUE WOHNUNG IN EINEM STARKREGEN GEFÄHRDETEN BEREICH ERRICHTET, ERGIBT DAS IN 10 JAHREN MEHR ALS 500 ZUSÄTZLICHE GEFÄHRDETE WOHNUNGEN. DIES VERDEUTLICHT DIE NOTWENDIGKEIT SICH SCHON IN DER BEBAUUNGSPLANUNG MIT DEN FOLGEN VON STARKREGEN AUSEINANDERZUSETZEN.

Schaffung von Entlastungspunkten & Retentionsflächen

Um gezielt Entlastungspunkte zu schaffen, können angepasste Nutzungsformen hier Möglichkeiten bieten. So sind beispielsweise multifunktionale Flächennutzungen eine gute Möglichkeit im Starkregenfall Retentions- und Überschwemmungsflächen zu bieten und so vorbeugend einen Beitrag zur Reduzierung der Abfluss-Menge und -Geschwindigkeit zu leisten.



Abbildung 21: Beispiele von Entlastungspunkten und Multifunktionaler Nutzflächen in einem Spielplatz. Quelle: (MDDI; Département de l'aménagement du territoire, 2012)

Entlastungskorridor

Wenn bei Ausweisung von Neubaugebieten im Umkreis topografische Höhenunterschiede liegen, so könnte man zum Beispiel, um das anfallende Oberflächenwasser bei Starkregen schadlos abzuführen, **Entlastungskorridore** vorsehen.

So könnten in der Raumplanung schon bei der Ausweisung Straßen (siehe Kapitel [Notwasserwege](#)), Grünstreifen andere öffentliche Verbindungen vor ihrem Ausbau als Entlastungskorridore in die Städteplanung einfließen. Diese können natürlich auch multifunktional gestaltet werden.



Abbildung 22: Entlastungskorridor der Engelberger Aa, 2005. Quelle: (Grambow, 2013)

Dachbegrünung

Teil einer Maßnahmenkombination in der raumplanerischen Vorsorge können zudem begrünte Dächer sein. Diese zeichnen sich durch Wasserrückhalt und Abflussverzögerung aus. Der Regenwasserrückhalt entsteht vor allem durch die Zwischenspeicherung des Wassers in dem Substrat und in der Drainageschicht (Brune, 2017). Zeitverzögert fließt das Wasser dann nach Sättigung der Schichten über einen längeren Zeitraum ab. Dementsprechend werden Abflussspitzen in den kommunalen Entwässerungssystemen gedämpft bzw. entlastet. In der Dachbegrünungsrichtlinie der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL 2008) sind Werte für die Abflusskennzahl C und die Wasserrückhaltung im Jahresmittel (Ψ_a / Versiegelungsfaktor) festgelegt (siehe Tabelle), welche sich je nach Aufbauhöhe unterscheiden (Brune, 2017). Sind die Effekte bei Starkregen auch schnell erschöpft, so empfiehlt es sich trotzdem solche Maßnahmen als No-Regret-Maßnahme als Teil eines integralen Konzepts umzusetzen. So können die Effekte einzeln betrachtet gering sein, doch in hohem Umsetzungsgrad und in Kombination mit anderen Maßnahmen den entscheidenden Unterschied machen. Ein zusätzlicher positiver Effekt der Dachbegrünung ist die Förderung der Verdunstung und somit die Annäherung der Wasserbilanz an den un bebauten Zustand (Brune, 2017).

Tabelle 3: Ansatzwerte für die prozentuale jährliche Wasserrückhaltung bei Dachbegrünung in Abhängigkeit der Aufbaudicke. Quelle: (Brune, 2017)

Begrünungsart	Aufbaudicke (cm)	Vegetationsform	Wasserrückhalt Jahresmittel (%)	Jahresabflussbeiwert
Extensivbegrünung	2-4	Moos-Sedum-Begrünung	40	0,60
	> 4-6	Sedum-Moos-Kraut-Begrünung	45	0,55
	> 6 - 10	Sedum-Moos-Gras-Begrünung	55	0,45
	> 15 - 20	Gras-Kraut-Begrünung	60	0,40
Intensivbegrünung	> 15 - 25	Rasen, Stauden, Kleingehölz	60	0,40
	> 25- 50	Rasen, Stauden, Sträucher	70	0,30
	> 50	Rasen, Stauden, Sträucher, Bäume	>90	0,10

Servitudes d'urbanisation

Das Gesetz vom 19. Juli 2004 über Stadtplanung und Stadtentwicklung bietet die Möglichkeit „servitudes d'urbanisation“ auszuweisen um die hier wichtigen Gewässerläufe und Bäche und ihren Entwicklungsraum rechtskräftig vor Bebauung zu schützen. So fordert auch die Wasserverwaltung in ihren Stellungnahmen zu den Bebauungsplänen seit längerer Zeit eine „servitude d'urbanisation cours d'eau“ entlang der Gewässer um dem Gewässer genügend Raum, zur Entwicklung und schadfreien Ausdehnung im Hochwasserfall, zu lassen.

„CE servitude « urbanisation – cours d'eau » : En vue de protéger, de mettre en valeur et de renaturer le cours d'eau (avec le but du développement de la végétation caractéristique), toute construction, toute modification du terrain naturel ainsi que tout changement de l'état naturel dans un rayon de 5 mètres de part et d'autre du cours d'eau sont prohibés. »

Weiterhin wird auch auf die Freilassung der Talwege hingewiesen:

En termes de risque de crues subites, il s'avère judicieux de laisser les talwegs libres de toute construction à travers la mise en place de servitudes.

In speziell gefährdeteren Situationen sollten weiterhin, nach Veröffentlichung der Starkregengefährdungskarten, auch auf die Freilassung und Auszeichnung von Notwasserwegen hingewiesen werden:

Voie d'eau d'urgence : afin de pouvoir évacuer les eaux de surface sans dommage en cas de rares précipitations, des voies d'eau d'urgence devraient être prévues pour les zones prévues de grande ampleur topographique

Objektschutz

Auch wenn es unbedingt zu vermeiden ist, kommt es vor, dass aus Unwissenheit oder falschen Gründen, trotzdem im Talweg oder einer potentiellen Fließrichtung oder Überflutungsfläche gebaut wird. Zudem können bestehende Häuser neuen Gefahrensituationen durch unachtsame Oberlieger gefährdet sein. Um oberflächlich abfließendes Wasser gezielt von der Bebauung abzuhalten können auch Objektschutzmaßnahmen helfen. Auch hier ist jedoch zu beachten, das Wasser nicht so umzulenken, dass unterliegende Nachbarn von solchen Maßnahmen nicht negativ beeinflusst werden. Zudem ist bei der Auswahl des Objektschutzsystems, die schnelle Reaktionszeit und die geringe Vorwarnzeit zu beachten. Geeigneter Objektschutz hilft jedoch die Widerstandskraft eines Gebäudes zu erhöhen und bleibt, je nach Rahmenbedingung, die letzte Maßnahmenalternative. Weiterhin, geben solche Maßnahmen bereits geschädigten Personen, die Sicherheit zurück, sich in den Sommermonaten (der Starkregensaison) ohne Angst vor Verlusten von ihrem Haus entfernen zu können. Auch wenn es nur wenige Studien sind, so zeigen jedoch alle sehr deutlich, dass starkregengeschädigte Personen, längere Zeit nach dem Ereignis, noch psychische Gesundheitsprobleme als sekundäre Folgen von Überschwemmungen (Posttraumatischer Stress, Besorgnis, Angststörungen usw.) bekämpfen müssen haben (Ai Milojevic, 2017).

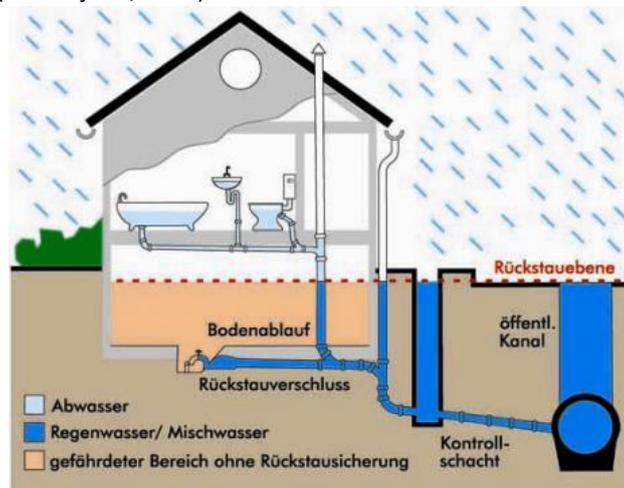


Abbildung 23: Rückstauabstufung. Quelle: DWA

Unterschieden wird hierbei zwischen zwei Kategorien: dem mobilen Objektschutz und dem festen Objektschutz.

Grundsätzlich folgt man hier dem Prinzip der Erhöhung der Widerstandskraft, und sucht nach den Schwachstellen der Bausubstanz bei Starkregen. Diese sind in der Regel das Eindringen von Wasser über sämtliche Wege: durch undichte Fugen und Umläufigkeiten bei Hausanschlüssen, durch Tür-/Fensteröffnungen, Lichtschächte, tiefliegende Garagen, undichte Rohrdurchführungen, verstopfte Dachrinnen und Fallrohre welche das Wasser über die Hauswand leiten und an sensiblen Bereichen eindringen lässt. So entstehen laut BMUB (2016) die meisten Schäden nach Wassereintritt an der Haussubstanz (BBSR, 2019):

- Sichtbare Durchfeuchtungen und Wasserstandslinien ;
- Ausblühungen von Bauteiloberflächen ;
- Feuchte Form- und Volumenänderungen ;
- Abgelöste Beschichtungen ;
- Sekundäre Schäden wie Befall von Schimmel;
- Kurzschlüsse von Elektroinstallationen ;
- Korrosion von Leitungen.

Fester Objektschutz

Weiterhin lässt sich stehendes Wasser jedoch auch durch feste Maßnahmen an Eingängen und Fenstern durch verschiedene **wasser- und druckdichte Einbauten** vom Eindringen vermeiden (BBSR, 2019).

Es gibt verschiedene **Rückstausicherungen**, die verhindern, dass Wasser über die Rückstauenebene (die höchste Ebene, bis zu der Wasser in einer Entwässerungsanlage planmäßig aufsteigen darf) hinweg, ins Haus gedrückt wird (BBSR, 2019). Bei Rückstauverschlüssen, wie zum Beispiel Rückstauklappen ist darauf zu achten, dass Abwasser, im Mischsystem bei einem Rückstau nicht mehr abgeführt werden kann. Zu den festen Systemen werden hier z.B. druckdichte Fenster und Türen gezählt.



Abbildung 24: Beispiele von festen (aber beweglichen) Objektschutzmaßnahmen

Mobiler Objektschutz



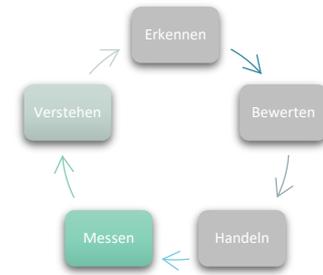
Abbildung 25: Mobiles Dammbalkenschutzsystem. Quelle: IBS GmbH

Neben den feststehenden Objektschutzmaßnahmen gibt es auch eine Reihe mobiler Systeme, die das Wasser ablenken oder fernhalten. Die mobilen Systeme beinhalten aufbaubare Dammbalkensysteme oder Systeme, die erst im Hochwasserfall aufgebaut werden. Anders als bei einem klassischen Hochwasser sind Starkregen sehr plötzliche Ereignisse und die Vorwarnzeiten gering bis nicht vorhanden. Daher soll speziell in der Starkregenvorsorge bedacht werden, dass mobile Objektschutzsysteme die von einer oder mehreren Personen vor Ort aufgebaut werden müssen, sich hier nicht immer bewähren. Daher eignen sich im Starkregenfall **Systeme, die sich im Überflutungsfall selbst aufbauen** oder nicht aufgebaut werden müssen am besten⁷.

⁷ Erläuterung zur staatlichen Förderung von Objektschutz an Gebäuden gegen Hochwasser können auf waasser.lu unter services aux citoyens – formulaires – prise en charge par le fonds pour la gestion de l'eau heruntergeladen werden

4.4 Messen & Verstehen

Dieser Teil des Kreislaufs des Starkregenrisikomanagements steht dafür Daten und Wissen zu gewinnen, Hypothesen zu prüfen, und zu besserem Verständnis der naturwissenschaftlichen Phänomene um Sturzfluten und Starkregen zu führen. Weiterhin gilt er der Kontrolle und Überwachung der (auf den gewonnenen Erkenntnissen) entwickelten Vorgehensweisen und Maßnahmen. Dies um durch besseres Prozessverständnis die Vorhersage und durch die Erfolgskontrolle bestehende Maßnahmen verbessern zu können.



4.4.1 Vergangene Ereignisse

In der jüngeren Vergangenheit haben Starkniederschläge mit extremen Niederschlagsintensitäten in mehreren luxemburgischen Gemeinden zu schweren Überflutungen mit hohen Schäden geführt.

Sturzflutereignis von 2016 im Einzugsgebiet der weißen Ernz in der Region Larochette

Am 22. Juli 2016 führte eine instabile, feuchte Luftmasse über Westeuropa über dem Großherzogtum Luxemburg immer wieder zu lokalen Gewittern. Die Situation verschlimmerte sich zunehmend durch ein Tiefdruckgebiet, das über dem Südosten der Großregion entstand und die Bildung von Gewittern zusätzlich förderte. Dies führte zu lokalen konvektiven Gewittern mit hohen Niederschlagsintensitäten.

Das Starkregenereignis im Bereich Waldbillig bis Nommern war auf drei konvektive Zellen zurückzuführen.

Die erste davon bildete sich um 19:30 Uhr (MEZ) über Fohren und Longsdorf, etwa 5,3 km bzw. 4 km nordöstlich von Gilsdorf. Eine weitere befand sich zur selben Zeit über Larochette. Die quasi-stationäre konvektive Zelle über Larochette wurde immer größer und stärker, bis sie gegen 20:00 - 20:15 Uhr (MEZ) auf die konvektive Zelle über Longsdorf stieß, wodurch um 20:20 Uhr (MEZ) ein Gewitter über der Region von Larochette bis nach Longsdorf entstand. Nur zehn Minuten später stieß eine weitere Gewitterzelle, die sich in kürzester Zeit über Echternach entwickelte und sich in Richtung Westen bewegte, auf die quasi-stationäre Zelle über der Ernzalregion und verstärkte das hier stattfindende Gewitter.⁸

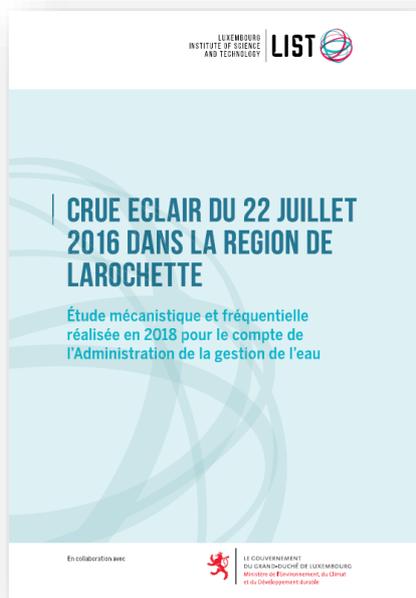


Abbildung 26: Die Broschüre der Mechanismus- und Frequenzstudie 2016

Nach dem Sturzflutereignis von 2016 im Einzugsgebiet der weißen Ernz in der Region Larochette wurde in Zusammenarbeit vom Wasserwirtschaftsamt und dem LIST (Luxembourg Institute of Science and Technology) eine erste detaillierte Analyse aller meteorologischen und hydrologischen Daten bis 2016 durchgeführt. Die Idee bestand darin, eine breite Palette von Daten zu sammeln (meteorologische Daten von Wetterstationen, Wetterradar-daten, In-situ-Bilder und -Filme, Satelliten-Fernerkundungsdaten) und das Ereignis zu quantifizieren (frühere Bodenfeuchteverhältnisse, vorherrschende Bodenbedeckung, Bodeninfiltrationsvermögen, Niederschlagsintensität, Wiederkehrperioden der Niederschlagsintensität). Dies trägt dazu bei, neue Erkenntnisse über die hydrometeorologischen Prozesse zu gewinnen, die die Sturzflut kontrolliert und erzeugt haben.

Die mit Hilfe von Radar und pluviometrisch gemessenen Werten rekonstruierten Intensitäten des Ereignis 2016 zeigten, dass maximal 47,6 mm über 10 Minuten, 98 mm über 60 Minuten und 117,2 mm über 360 Minuten fielen. Als Reaktion auf dieses außergewöhnliche konvektive Wetterereignis erzeugten die Hydrosysteme lokal beträchtliche Flutwellen. Die beobachteten Hochwasseranstiegszeiten waren an den untersuchten hydrometrischen Stationen besonders schnell - an der Ernz Blanche bei Larochette oder am Hallerbach erreichten sie kaum 90 Minuten. Die Häufigkeitsanalyse des maximalen Hochwasseranstiegs, der während der Episode vom 22. Juli 2016 am Hallerbach beobachtet wurde, lässt auf eine Wiederkehrperiode von fast 50 Jahren für dieses

⁸ Aus: Starkregenvorsorgekonzept für die Gemeinde Nommern PHASE I, EEPI, 2021

Ereignis schließen. Der über 15 Minuten beobachtete maximale Hochwasseranstieg wäre jedoch bei einer Wiederkehrperiode von "nur" 10 Jahren nicht außergewöhnlich gewesen.

Tabelle 4: Hydrologische Merkmale des Hochwasserereignisses vom 22. Juli 2016 an der weißen Ernz und am Hallerbach. Quelle: LIST, AGE, 201

	Weißer Ernz (Larochette)	Weißer Ernz (Reisdorf)	Hallerbach (Château de Grondhaf)
Beobachtungsreihe	2014-2016	2009-2016	2006-2016
Fläche des EZG	70.03 km ²	100.78 km ²	19.4 km ²
Anstiegszeit seit Beginn der Regenfälle	1:30 h	3:00 h	1:45 h
Maximaler Anstieg (in 15')	63.3 cm	108.9 cm	42.0 cm
Gesamtanstieg	175.9 cm	293.9 cm	103.6 cm

Nach der Zusammenstellung der Radardaten in der Masterarbeit von G. Lavandier befand sich die Niederschlagszelle mit der höchsten Intensität im östlichen Teil des Schrondweilerbach-Einzugsgebietes (Einzugsgebiet Tirlbaach, nördliches Einzugsgebiet Weißer Ernz). Im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs selbst wurde ein mittlerer Niederschlag von 98,6 mm ermittelt, was einem Oberflächenniederschlag von etwa 1.757.910 m³ entspricht. Die Radardaten mussten mit Hilfe von Niederschlagsmessungen am Boden korrigiert werden. Die Niederschlagsdauer des Ereignisses betrug etwa 60 Minuten.

Beim Vergleich mit den KOSTRA-Werten der deutschen Station Bollendorf zeigt sich, dass es sich bei den gemessenen Werten um einen Starkregen mit einer Jährlichkeit von > 100 Jahren handeln könnte.

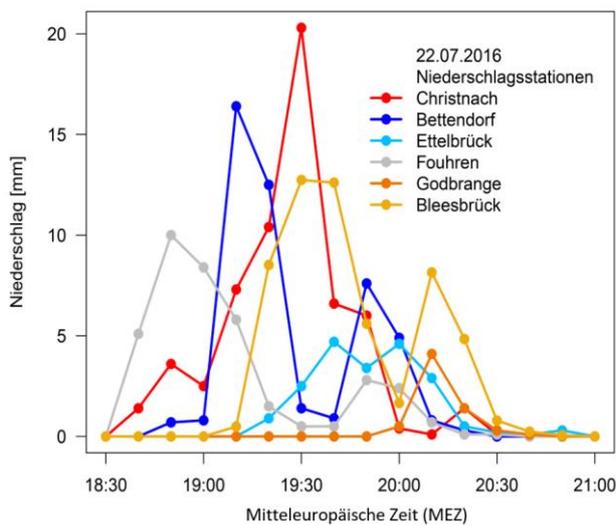


Abbildung 27: Gemessene 10-minütige Niederschlagssummen aus (Starkregenvorsorgekonzept für die Gemeinde Nommern, Phase 1, EEPI, 2021)

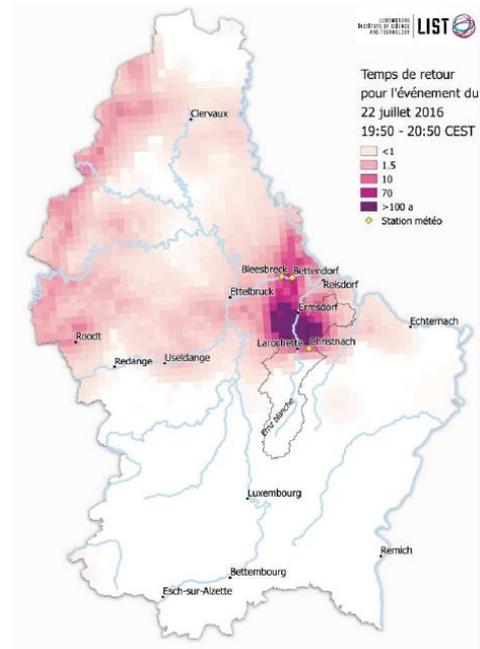


Abbildung 28: Wiederkehrzeiten für Dauerstufe 60min beim Ereignis 2016

Sturzflutereignis 2016 Aalbach und Briedembach in Frisange

Schon zuvor hatte es am 30. Mai 2016 ein bemerkenswertes Starkregenereignis im Süden Luxemburgs gegeben, bei dem es in 24 Stunden fast 90 mm geregnet hat (siehe Abbildung 29).

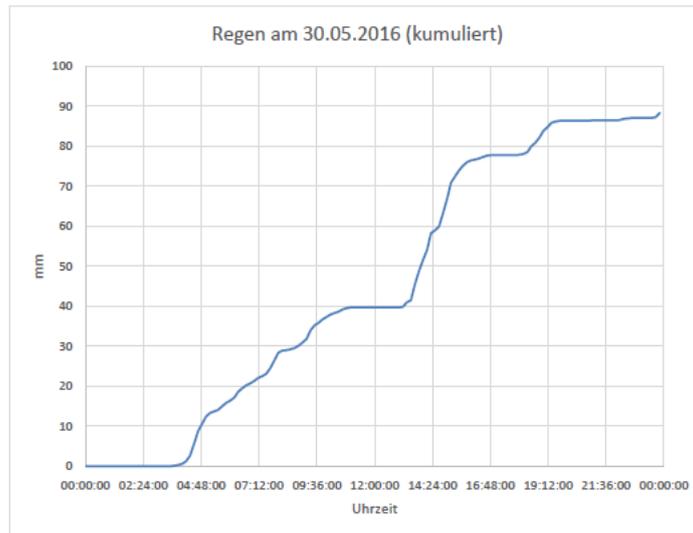


Abbildung 29: Kumulierung der Niederschläge vom 30.05.2016 an der Wetterstation Livange (Bericht Phase 1 Starkregenrisikomanagementkonzept AC Frisange, Luxplan, 2019)

Folgende Niederschlagsintensitäten gehen aus der Wetterstation Livange hervor.

Tabelle 5: Niederschlagsintensitäten im Starkregenereignis 2016 an der Wetterstation Livange

Zeitraum 30.06.2016	Niederschlag
00:00 – 12:00	40 mm
12:00 – 18:00	38 mm
18:00 – 00:00	10 mm

Aus diesen Niederschlagsmengen lassen sich mehrere Peaks erkennen. Vergleicht man diese Daten mit dem LuxBeRe-Datensatz für dieses Gebiet, so ergeben sich über mehrere ausgewählte Zeiträume die folgenden Jährlichkeiten. In den ersten 12 Stunden, kann eine Jährlichkeit von knapp unter 10 Jahren festgestellt werden. Die nächsten 6 Stunden verzeichnen Niederschläge mit einer Jährlichkeit von 5 Jahren. Die Summe über 18 Stunden ergibt ein Ereignis, das eine Wiederkehrzeit von 50 bis 100 Jahren hat. Aus der Summe über 24 Stunden, kann sogar ein Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 200 Jahren ermittelt werden, was den außergewöhnlichen Charakter dieses Ereignisses verdeutlicht.

Tabelle 6: Wiederkehrzeiten für Livange aus LuxBeRe (mm)

Wiederkehrzeit/Dauerstufe	6 Stunden	12 Stunden	18 Stunden	24 Stunden
10-Jährlich	44,81	51,29	57,06	59,38
20-Jährlich	52,08	58,62	64,78	67,00
50-Jährlich	62,63	68,92	75,47	77,46
100-Jährlich	71,37	77,22	83,93	85,68
200-Jährlich	80,83	85,98	92,73	94,17

Sturzflutereignisse 2018 in den Einzugsgebieten der weißen Ernz, schwarzen Ernz und Attert

Angesichts des Auftretens mehrerer Sturzfluten im Jahr 2018 in Luxemburg wurde die Arbeit von 2016 weitergeführt und die historischen klimatischen und hydrologischen Datenbanken als auch die räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Daten (kontinuierliche meteorologische und hydrometrische Aufzeichnungen, meteorologische Radarbilder), über die konvektiven Episoden der Sommer 2016 und 2018 zusammengetragen.

Der zweite Bericht in Zusammenarbeit vom Wasserwirtschaftsamt und dem LIST widmete sich den Ereignissen des Sommers 2018 in den Einzugsgebieten der weißen Ernz, der schwarzen Ernz, der Attert und des Aalbachs in Greiveldange. Anhand der Datengrundlage, ergänzt durch zusätzliche Informationsquellen (z.B. Wetterradarerfassung der Ereignisse), wurde vom LIST eine detaillierte mechanistische Studie durchgeführt. Es sollten die Prozesse identifiziert werden, die zur Entstehung der wiederholten Sturzfluten in dem sehr begrenzten geografischen Gebiet, führten. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die früheren Feuchtigkeitsbedingungen (geschätzt anhand von Wasserbilanzen, die auf der Basis täglicher Zeitschritte berechnet wurden) und auf die zwischen Ende Mai und Mitte Juni 2018 beobachteten kumulierten und maximalen Niederschlagsintensitäten gelegt. Die mechanistische Studie wurde durch eine statistische Analyse ergänzt, die darauf abzielte, die Ereignisse der Jahre 2016 und 2018 in einen breiteren Frequenzkontext zu stellen. Die wiederholte regelmäßige Durchführung von statistischen Auswertungen ist ein nicht-unwichtiges Element, um anhand von Ergebnisvergleichen Schlussfolgerungen ziehen zu können.

Das Ereignis vom 31. Mai bis 1. Juni 2018

2018 sollte gleich eine ganze Serie von Ereignissen in Luxemburg fallen. Bei einem ersten Starkregenereignis 2018 wurden am 1. Juni im Osten und Südosten des Landes die höchsten Niederschlagsintensitäten mit 15,5 mm in 10

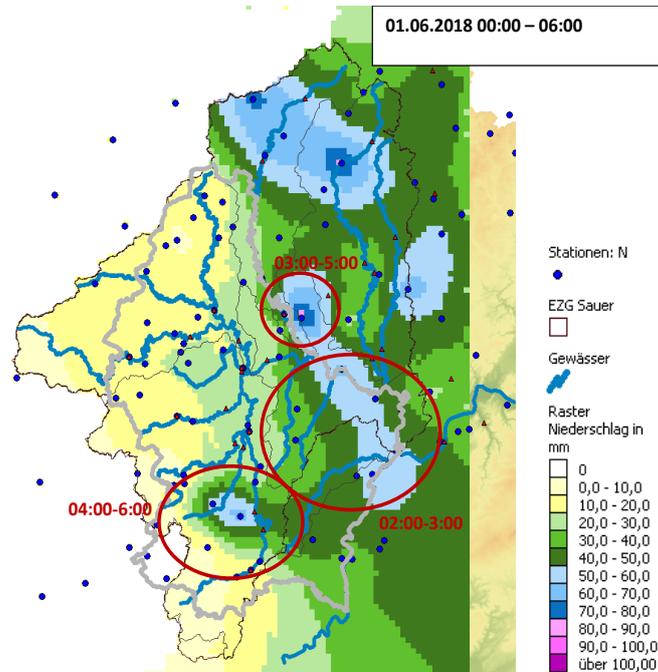


Abbildung 30: Interpolierte Niederschlagssummen der Gewitter des 01. Juni 2018

Minuten bei Waldbilling und 14 mm in 10 Minuten bei Grevenmacher gemessen, siehe Abbildung 30. Die höchsten Niederschlagssummen wurden in Waldbilling gemessen und so fielen in 1 Stunde 72,1 mm und in 6 Stunden 100,6 mm bzw. in 24 Stunden 113,7 mm. Die verteilten Niederschläge in den fünf von Sturzfluten betroffenen Einzugsgebieten am 1. Juni 2018 reichten von 33 mm (Einzugsgebiet der Schwarzen Ernz im Mullerthal) bis 56 mm (Einzugsgebiet der Schwarzen Ernz im Teileinzugsgebiet Hallerbach). Die geschätzten maximalen Niederschlagsintensitäten variierten zwischen 1,9 und 4,8 mm in 5 Minuten.

Der Agrarmeteorologische Dienst des Ministeriums für Landwirtschaft, Weinbau und Konsumentenschutz meldete hierzu am 13.06.2018 in einer Pressemitteilung⁹:

Nach der Auswertung der Niederschlagsdaten der 30 Stationen des meteorologischen Netzwerks der Administration des services techniques de l'agriculture (ASTA) kam der meteorologische Dienst zu dem Schluss, dass während des Unwetters in der Nacht vom 31. Mai auf den 1. Juni 2018 ein neuer Tagesniederschlagsrekord im ASTA-Netzwerk seit 1949 verzeichnet wurde.

[...] wurde an der Station Waldbilling am 31. Mai 2018 ein neuer Tagesrekord von 101,3 l/m² aufgezeichnet. Die bisherigen Tagesrekorde wurden in Arsdorf am 29. Mai 2008 mit 100,7 l/m², in Reuler am 28. Mai 2008 mit 93,6 l/m² und in Remerschen am 24. Juli 1994 mit 92,3 l/m² gemessen.

Gleichzeitig wurde am 1. Juni 2018 zwischen 2:00 und 3:00 Uhr Ortszeit mit 72,1 l/m² ein neuer stündlicher Niederschlagsrekord im ASTA-Netz registriert.

Mangels ausreichend genauer Bemessungskurven für hohe Abflüsse konnte die hydrologische Antwort auf den Starkregen anhand von Hochwasserwellen nur für die Ernz Blanche bei Larochette, die Ernz Noire bei Mullerthal, den Hallerbach und den Aalbach quantifiziert werden (Abbildung 31, Abbildung 32). Aus den gleichen Gründen konnten nur für die Ernz Blanche bei Larochette (22 %), die Ernz Noire bei Mullerthal (39 %), den Hallerbach (40 % ± 8 %) und den Aalbach (23 % ± 2 %) Durchflusskoeffizienten ermittelt werden. Die Anstiegszeiten an der Hochwasserspitze variierten zwischen 1 bis 2 Stunden (Hallerbach & Ernz Noire bei Mullerthal) und zwischen 3 bis 5 Stunden (Ernz Blanche bei Larochette & Reisdorf). Am Aalbach dauerte der Anstieg der Ganglinie 3 Stunden.

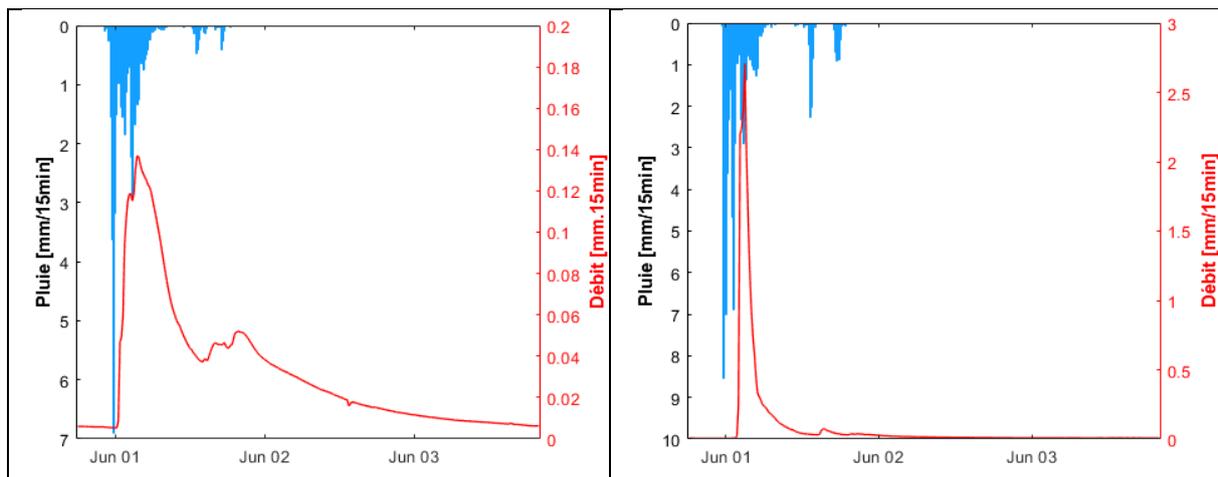


Abbildung 31: [Links] Niederschlag und Abfluss der Weißen Ernz an der Larochette vom 31. Mai bis 3. Juni 2018. [Rechts] Niederschlag und Durchfluss des Hallerbachs vom 31. Mai bis 3. Juni 2018.

⁹ (Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et de la Protection des consommateurs, 2018)

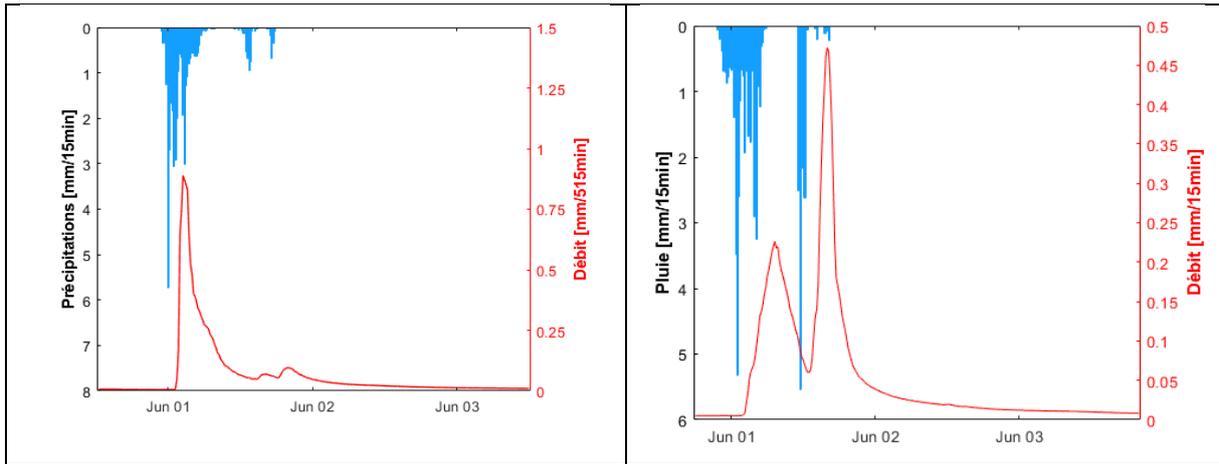


Abbildung 32: [Links] Niederschlag und Abfluss der Schwarzen Ernz bei Müllerthal vom 31. Mai bis 3. Juni 2018. [Rechts] Niederschlag und Abfluss des Aalbachs vom 31. Mai bis 3. Juni 2018.

Das Ereignis vom 9. bis 10. Juni 2018

Ein paar Tage später, am 9. Juni 2018 wurde darauffolgend im Attert-Einzugsgebiet ein Ereignis mit Niederschlagsintensitäten von 53.3mm in 1 Stunde und 64.8mm in 6 Stunden an der Station Reichlange gemessen. Das, zwischen dem 9. und 10. Juni 2018 beobachtete, konvektive Ereignis betraf erneut den östlichen

Tabelle 7: Gemessene Niederschlagssummen und maximale Stundenwerte im Zeitraum 09.Juni 2018 bis 10. Juni 2018

	00:00-00:00	
	Summe	Max. / h
Potaschbiertg	52,49 l/m ²	27,9 l/m ² (02:00-3:00)
Bollendorf	71,11 l/m ²	39,75 l/m ² (02:00-3:00)
Diekirch	38,08 l/m ²	7,13 l/m ² (06:00-07:00)
Vianden	59,22 l/m ²	29,57 l/m ² (03:00-04:00)
Mersch	31,83 l/m ²	6,34 l/m ² (04:00-05:00)
Heiderscheid	41,10 l/m ²	6,29 l/m ² (04:00-05:00)

Rand des Landes sowie einen Sektor des Attert-Beckens zwischen den Ortschaften Useldange und Bissen. Im Einzugsgebiet der Schwarzen Ernz fielen reichlich Niederschläge. Im Teileinzugsgebiet des Hallerbachs wurde ein

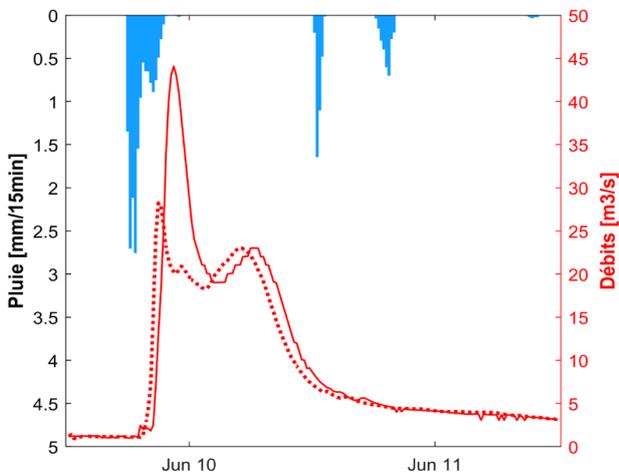


Abbildung 33: Niederschlag und Wasserführung der Attert bei Useldange (gepunktete Linie) und Bissen (durchgezogene Linie) vom 9. bis 11. Juni 2018.

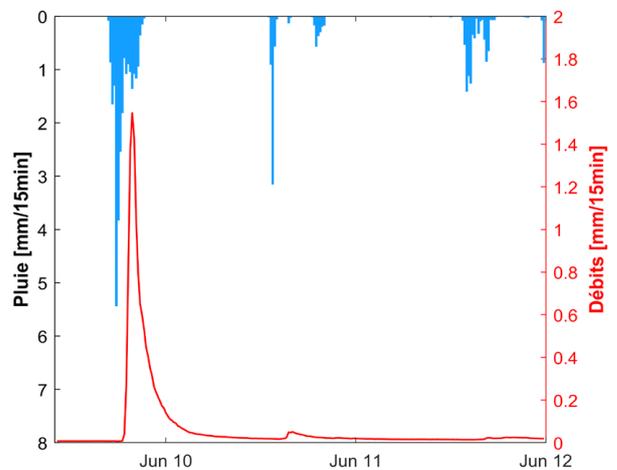


Abbildung 34: Hallerbacher Niederschlag und Abflussmengen vom 9. bis 10. Juni 2018.

Niederschlag von 26,3 mm und eine maximale Intensität von 2,9 mm in 5 Minuten registriert. Dieser Summenwert und die maximale Intensität sind deutlich höher als die Werte, die in den anderen Einzugsgebieten des Untersuchungsgebiets beobachtet wurden, mit Ausnahme des Einzugsgebiets der Attert, wo (zwischen Useldange und Bissen) der Niederschlag 19,9 mm erreichte, mit einer maximalen Intensität von 2,8 mm in 5 Minuten. Wieder im Osten des Landes, wurde dann am 10. Juni 2018, ein drittes (diesmal schwächeres) Ereignis mit bemerkenswerten Niederschlagsintensitäten aufgezeichnet. Ausserdem wurden Intensitäten von 18.3mm in 10 Minuten und 48.9 mm in 1 Stunde in der Nähe von Roeser gemessen. Den Osten des Landes hat es am gleichen Tag nochmals erwischt, wo starke Regenfälle mit 32.2mm in 1 Stunde und 69.2mm in 24 Stunden in Waldbillig zu stark erhöhten Abflüssen führten.

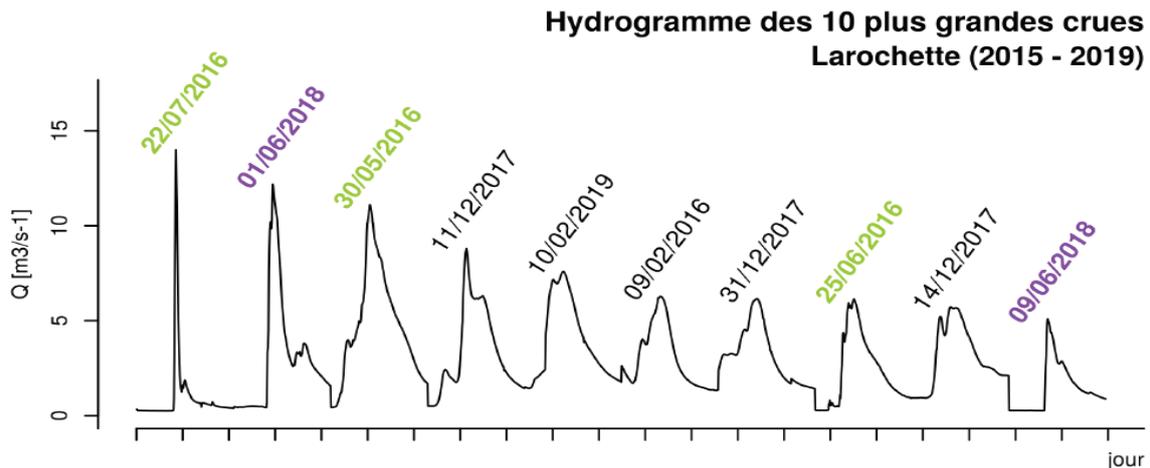


Abbildung 35: Gegenüberstellung von neun großen Hochwasserwellen auf der weißen Ernz bei der Station Larochette (Beobachtungszeitraum 2015-2019): [grün] Ereignisse von 2016; [violett] Ereignisse von 2018. Höhepunkt der Flutwelle von 2019 ist noch nicht bestätigt.

Da die Serie der hydrometrischen Beobachtungen in Larochette für eine stabile Häufigkeitsanalyse derzeit noch zu kurz ist, wurden die neun größten Hochwasserwellen der zwischen 2015 und 2019 beobachteten Hochwasserwellen gegenübergestellt. Dies verdeutlicht den außergewöhnlichen Charakter der Ereignisse von 2016 und 2018.

Das Rekordhochwasser im Juli 2021

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Anhangs waren die abschließenden Resultate der wissenschaftlichen Analyse des Hochwassers vom Juli 2021 noch nicht abgeschlossen. Gilt das Hochwasser im Juli 2021 nicht als Starkregenereignis, so kam es trotz allem in einer ersten Phase auch zu erheblichen Schäden durch Starkregen, gesättigtem Oberflächenabfluss und pluvialen Überschwemmungen. Diese pluvialen Überschwemmungen waren jedoch nicht wie sonst in anderen Ereignissen kleinräumige Sturzfluten infolge von konvektivem Gewitter, sondern großflächig und zeitlich inmitten eines Dauerregens. So ist davon auszugehen, dass hier zwei Phänomene konvergierten. Im Rahmen eines Dauerregens, bildeten sich immer wieder Starkniederschläge aus die zu starkem Hangabfluss auf gesättigten Böden, führten. Auf Grund der flächendeckenden Ausbreitung dieser pluvialen Überschwemmungen und der Schnelligkeit des Oberflächenabflusses, stiegen die Wasserpegel an den Flüssen rasant an. Auf die pluvialen flächendeckenden, lokalen Hochwasser folgte ein fluviales Rekordhochwasser.

4.4.2 Das Forschungsprojekt „Industrial Fellowship Flashflood“ (01.12.2018 – 30.11.2020)

Nachdem Luxemburg in den letzten Jahren wiederholt von heftigen Starkregenereignissen getroffen worden ist, wurden verschiedene Strategien entwickelt, um die potentiellen Schäden dieses hydrometeorologischen Gefährdungsrisikos zu reduzieren. Die internationalen Klimamodelle prognostizieren eine Zunahme meteorologischer Extremereignisse in Häufigkeit und Intensität durch den klimatischen Wandel. Nichtsdestotrotz, sind die derzeit zur Verfügung stehenden Werkzeuge zur Minimierung von Hochwasserrisiko, wie zum Beispiel das Monitoring und die Vorhersage von Hochwasserereignissen, nicht so einfach auf Starkregenereignisse übertragbar. Konventionelles Hochwassermonitoring und deren Vorhersagemodelle, sind

in erster Linie entwickelt worden um großflächige (Winter-)Hochwasser nach langanhaltendem Regen vorherzusagen. Die operationelle Vorhersage von Starkregenereignissen stellt heutzutage eine noch größere Herausforderung dar.

Drei große Unsicherheitsfaktoren prägen den derzeitigen Wissenstand um die Starkregenvorhersage und das Monitoring von Sturzfluten. Zum einen sind eine präzise räumliche Vorhersage von Starkregen, sowie die Vorhersage der Intensität der meisten konvektiven Ereignisse derzeit nur mit sehr kurzer Vorwarnzeit möglich. Zum anderen ist die Dichte der konventionellen Monitoringnetze oft zu grob um die sehr kleinräumigen Wolkenbrüche zu erfassen und zu messen. Letztendlich eignen sich die meisten Hochwasservorhersagemodelle nur begrenzt für die sehr spezifische räumliche und zeitliche Skala auf der sich ein Starkregenereignis abspielt.

Demzufolge werden neue Methoden zum besseren Monitoring der hydrologischen Prozesse während des Starkregenereignisses dringend benötigt. Das luxemburgische Wasserwirtschaftsamt, zuständig für Hochwasservorhersage und -monitoring, hat daher in Zusammenarbeit mit der POST Telecom Luxemburg und dem Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) ein Forschungsprojekt zur Entwicklung neuer Monitoringmöglichkeiten und zur Verbesserung der Vorhersage von Sturzfluten gestartet. Im zweijährigen, vom Fonds National de la Recherche finanziell unterstützten, Industrial Fellowship Projekt „Flash Flood“ forscht man daher seit Beginn 2019 am Monitoring des Phänomens Starkregen.

Als Testgebiet diente das Einzugsgebiet der weißen Ernz. Als Nebengewässer der Sauer entwässert die weiße Ernz auf einer 27,5 km langen Geässerstrecke ein 101 km² großes Gebiet. Das Einzugsgebiet der weißen Ernz zeigt eine wechselhafte Topographie. Die Höhe im Quellgebiet liegt bei 421m und im Mündungsbereich in Reisdorf bei 177m. Das mittlere Gefälle liegt bei 0,9%. Hier fielen am Abend des 22. Juli 2016 extreme Niederschläge. Das Starkregenereignis wird auf mehrere konvektive Zellen zurückgeführt (in Kapitel 1 genauer beschrieben). Während sich eine gegen 19:30 in der Nähe von Longsdorf bildete, befand sich eine zweite zur selben Zeit über Larochette. Diese quasi-stationäre Gewitterwolke wurde immer größer und stärker bevor sie gegen 20:00 mit der Gewitterwolke über Longsdorf zusammenstieß. Eine dritte Gewitterzelle bildete sich später im Süden Echternachs, wanderte westwärts und verstärkte das Ereignis weiter. Obwohl in der näheren Umgebung des Ereignisses 6 Pluviometer standen und in Christnach ein Regenmesser im Einzugsgebiet steht, wurde das Ereignis nur teilweise erfasst.

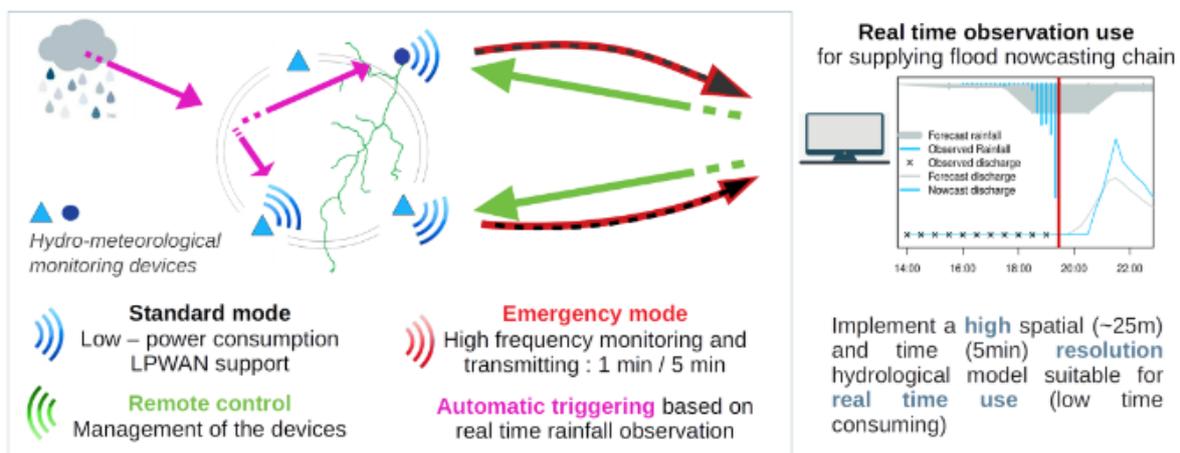


Abbildung 36: Schematische Darstellung des Projekts "Industrial Fellowship Flashflood". Quelle: Duiot, 2019

Im Testgebiet der weißen Ernz wurde daher ein sehr dichtes Messnetz, bestehend aus 4 Limnigraphen, 4 Niederschlagsmessern und Bodenfeuchtmessern aufgebaut. Hier soll die Hypothese getestet werden, dass die Unsicherheit in Verbindung mit dem Monitoring von extremen Regenereignissen durch die Erhöhung der Messdichte signifikant reduziert werden kann. Zudem sollen diese verbesserten und dichteren Messungen eines Regenereignisses die Entwicklung von Vorhersagemodellen von Starkregenereignissen vorantreiben.

Durch die Einbindung neuer Verbindungstechnologien im Bereich von IoT-, 5G- und LPWAN-Konnektivität wurden alle Geräte im Test-Einzugsgebiet über ein Cloud-System miteinander verbunden (siehe Abbildung 36). Durch dieses „Smart Monitoring“ können die Messintervalle jederzeit angepasst werden. Es wird zum Beispiel der Nutzen eines „Emergency Mode“ getestet, so dass die Messgeräte ihre Aufzeichnungen, bei Registrierung

eines intensiven Regens in den Niederschlagsmessern, in allen Geräten in einen höher getakteten Modus umschalten. Zudem erlaubt diese Art der Verbindung eine ständige Überwachung des Monitoringnetzes, das Einstellen verschiedener Alarmstufen, sowie ein Gerätemanagement und Fernwartung.

Schlussendlich sollen die in Echtzeit gewonnenen Daten über das Modell MARINE das Starkregenereignis simulieren. Das Modell MARINE wurde speziell für extreme Regenereignisse im mediterranen Raum in Frankreich entwickelt und integriert die hydrologischen Prozesse über hoch-aufgelöste (~25m), räumlich-differenzierte physikalische Gegebenheiten des Einzugsgebiets (Topographie, Boden, Geologie usw.) sowie hoch aufgelöste Regenverteilungen. Die zeitliche Auflösung des Modells liegt bei 5 Minutenschritten.

Das Modell ist Teil der PLATHYNES-Plattform und wurde als Kompromiss aus der Modellierung der hydrologischen Prozesse, der maximalen Integration der hydrodynamischen Prozesse und einer möglichst geringen Rechenzeit programmiert.

Für jede Rasterzelle im Einzugsgebiet werden 3 Prozesse modelliert:

- Infiltration über Green & Ampt;
- Subsurface Flow über eine generalisierte Darcy-Gleichung: in vereinfachter Form hängt die Strömungsgeschwindigkeit vom Sättigungsgrad im Boden und der Topographie ab;
- Die Oberflächenströmung erfolgt über die Saint-Venant-Gleichung mit kinematischer Wellenannäherung (Steigung und Rauheit sind die einzigen Treiber).

In allen Fällen werden Evapotranspirations- und Interzeptionsprozesse, nach dem Prinzip nur das zu modellieren was einen wesentlichen Einfluss auf das Ereignis hat, vernachlässigt.

Schlussfolgernd erwarteten sich die Projektpartner, dass das Projekt FLASHFLOOD - sowohl kurz- als auch langfristig - zwei Arten von Ergebnissen liefert: Ein sturzflut-spezifischer Überwachungs- und Prognoseprototyp

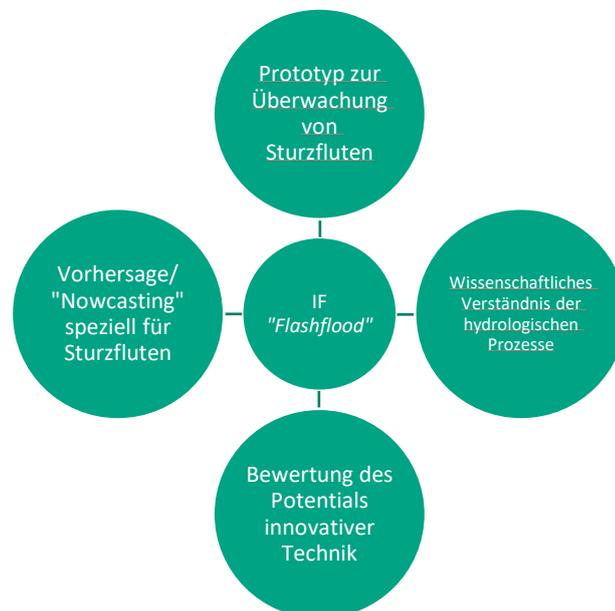


Abbildung 37: Die Arbeitspakete des Industrial Fellowship "Flashflood"

sowie die wissenschaftliche Erkenntnis über die grundlegenden hydrologischen Prozesse die zu Sturzfluten als Reaktion auf Starkregen führen.

Das Wasserwirtschaftsamt unterstützt das geplante FLASHFLOOD-Projekt durch die Finanzierung der Entwicklung von LPWAN-fähigen hydrometeorologischen Sensoren durch POST Telecom. Im Rahmen des Projekts hatte das Wasserwirtschaftsamt die Möglichkeit, das Potenzial für innovative Mess- und Modellierungstechniken zu bewerten, um die Unsicherheiten zu verringern, die mit Sturzflutprognosen verbunden sind, inklusive Hardwaretests vor Ort, Integration von Hardwarekonnektivität und

Sturzflutvorhersagemodell. Während das Sturzflutvorhersagemodell leider nicht komplett funktionierend parametrisiert werden konnte, konnte jedoch genau dies Erkenntnisse über die Grenzen des MARINE-Modells aufzeigen. Weiterhin wurde die Messtechnik in Kooperation mit dem LIST übernommen, so dass die vernetzten Messgeräte noch weiterhin Daten für weitere Erkenntnisse zur Verfügung stellen werden.

4.4.3 Drohnenbefliegung & Monitoring 2018

Nach dem Sturzflutereignis 2018 wurde eine Bestandsaufnahme der entstandenen Abflussprozesse im Müllerthal Gebiet mit einer Drohnenbefliegung beauftragt. Demenstprechend wurden zwei ganze Tage Befliegungen gemacht um die Erdoberfläche photogrammetrisch abzutasten. Dies entspricht ungefähr 760 ha, auf denen so verzerrungsfreie und maßstabsgetreue Abbildungen der Erdoberfläche gemacht werden konnten um im Anschluss präferentielle Fließwege zu identifizieren. Eine Befliegung kann dabei ungefähr 80 ha abdecken. Diese Befliegungen passierten hangparallel in 40-80 m Höhe. Aus der Überlappung der Orthophotos wurde anschließend ein digitales Geländemodell, kurz DGM, mit 3cm Genauigkeit abgeleitet.



Abbildung 38: Zusammenfluss der Schwarzen Ernz in die Sauer.

Die größte Herausforderung bei der Fließwegerkennung lag darin, dass die Aufnahmen nicht durch die Baumkronen hindurch gemacht werden können. Aus diesem Grund besteht der resultierende Großteil der Bilder aus Grünland und landwirtschaftlichen Flächen auf den Anhöhen um das Müllerthal, wobei bemerkenswerte Erosionen auf (noch blanken) Maisfeldern beobachtet werden konnten.

Nichtsdestotrotz waren die Entstehungsgebiete oft deutlich durch Erosionspfade zu erkennen. So startete die Erosion oft fächerartig auf kargem Acker ohne Zwischenfrucht und bündelte sich daraufhin im Talweg (siehe Abbildung 41).



Abbildung 40: Ablagerungen in Primäraue der Ernz oberhalb Grundhof



Abbildung 39: Ablagerungen/Schwemmkegel nördlich Berdorf/südlich Grundhof



Abbildung 41: Entstehungsgebiet eines verstärkten Abflusses, Abschwemmungen von Boden, Tiefenerosion, Abrutschung der Straße



Abbildung 43: Schäden in Grundhof



Abbildung 42: Anlandung von Boden durch oberliegende Erosion

Anhand dieser Abbildungen können Prozesse und Abläufe bildlich nachempfunden werden und konnten so mechanistische Phänomene die während einem Starkregenereignis passieren, erfasst werden. So können Erkenntnisse gewonnen werden, die wiederum das Prozessverständnis verbessern. All dies führt am Ende dazu das Starkregenrisikomanagement zu verbessern und die Handlungsoptionen zielführender einzusetzen.

4.4.4 Schadenserhebung



Abbildung 44: Flyer der Schadenserhebung

Der Kreislauf umfasst auch die Notwendigkeit einer Erfolgskontrolle sowie einer Validierung aller Risikobewertungsunterlagen. Eine solche Rückkopplung fehlt in vielen Risikomanagementstrategien, was zum gegenwärtigen Zeitpunkt oft zu unzureichenden Erfahrungswerten führt. Weiterhin entsteht so ein Lerndefizit bei der Reduzierung von Umweltgefahren.

Daher wurde vom Wasserwirtschaftsamt, als Reaktion auf die verheerenden Überschwemmungen in Luxemburg, Daten über die durch die Überschwemmungen verursachten Schäden sowie Vorwarnzeiten und Vorsorge gesammelt. Dies wurde mit einem Online-Fragebogen unter www.flashfloods.lu erhoben.

Mit dem Fragebogen sollen Schadensbeobachtungen, Daten und Informationen gesammelt werden, von Leuten die ein Ereignis durchlebt haben. Mit genügend Daten könnten so signifikante Schadensfunktionen zur Ermittlung des Schadenspotentials helfen die Kosten-Nutzen Bilanz in Abhängigkeit der Reduzierung der Überschwemmungshöhe zu erstellen. Bis jetzt gestaltet sich eine Auswertung jedoch schwierig, da zu wenig Fragebögen ausgefüllt wurden um signifikante Schadensfunktionen erstellen zu können. Hier gibt es sicherlich noch Verbesserungspotential, jedoch kann mit

diesem fertigen Fragebogen schnell reagiert werden.

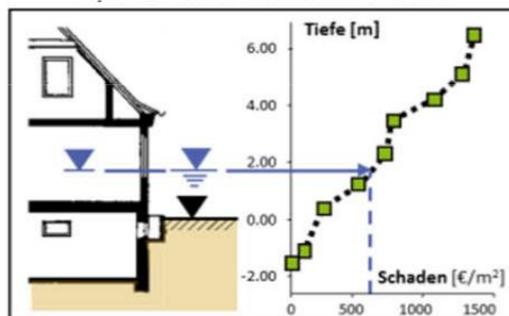


Abbildung 45: Beispielhafte Darstellung einer Schadensfunktion in Relation zur Höhe

4.4.5 Vorhersage

Die Überwachung und Vorhersage von Sturzflutereignissen stellt nach wie vor eine Herausforderung dar. Aus hydrologischer Sicht müssen wir folgende Herausforderungen, vor denen wir stehen bewältigen:

Die sehr spezifische Reaktion von Hydrosystemen auf außergewöhnlich intensive Regenfälle, die ungeeignete Auslegung konventioneller hydro-meteorologischer Überwachungsnetze für diese Art von lokalen Ereignissen, der Schwerpunkt der meisten Prognosemodelle auf großräumigen Flussüberschwemmungen, Hindernisse bei der Übertragung hydrometeorologischer Daten und das Fehlen eines umfassenden Archivs über Starkregenfälle und Sturzfluten in Europa.

“SICH SICHERER ZU KLINGEN, ALS DIE DATEN ES RECHTFERTIGEN KÖNNEN, IST EIN SICHERER WEG, DAS VERTRAUEN UND DIE GLAUBWÜRDIGKEIT ZU VERLIEREN.” (Stefanovic, 2003)

Aus meteorologischer Sicht können die Gebiete, in denen Gewitter auftreten können, frühzeitig eingegrenzt werden. Dies wird als abstrakte Gefahrenvorhersage bezeichnet. Es lässt sich jedoch nicht vorhersagen, wo, mit welcher Intensität und mit welcher räumlichen Auflösung sich Gewitter in diesen Gebieten bilden werden. Eine konkrete Vorhersage der hydrologischen Gefährdung ist daher nicht möglich, aber das meteorologische Gefährdungspotenzial kann abgeschätzt und vorhergesagt werden. Eine konkrete Gefahrenvorhersage ist demnach nicht möglich, das Gefahrenpotential kann jedoch abgeschätzt und vorhergesagt werden.

Tabelle 8: Die verschiedenen meteorologischen Möglichkeiten von Vorhersagetechniken aus (Grambow, 2013)

Vorhersagetechnik	Vorlaufzeit	Grundlage des Verfahrens
Nowcasting	Einige Stunden im Voraus (>6h)	Extrapolation der Bewegung aus Wetterradar Beobachtungen der Niederschlagsintensität. Zunehmend orientieren sich diese an den Ergebnissen numerischer Wettervorhersagemodelle oder werden mit diesen vermischt werden.
Numerische/deterministische Wetterprognose	Tage bis Wochen	Dreidimensionale Modellierung der Atmosphäre in horizontalem und vertikalem Netz (Schichten und Raster). Massen-, Impuls- und Energietransport und -transfer an der Land- und der Meeresoberfläche werden für jedes Kästchen simuliert. Initialisiert wird dies mit Beobachtungen verschiedenster landgestützter, ozeanographischer, atmosphärischer und satellitengestützter Beobachtungen.
Statistische Verfahren	Wochen bis Monate	Multiple Regression und andere statistische Techniken, die das zukünftige Wetter mit Indikatoren oder Prädiktoren verbinden. Beispiel Wahrscheinlichkeit für die El Niño-Südoszillation (ENSO) darstellen

Weiterentwicklungen LARSIM-Wasserhaushaltsmodell zur besseren Nachbildung der Abflussprozesse bei Starkregen

Wie oben beschrieben, sind Sturzflut-vorhersagen aus vielen hydrometeorologischen Faktoren nur schwer umsetzbar. Nichtsdestotrotz, wurden nach den Sturzflutereignissen von 2016 große Bemühungen angestellt um die hydrologische Simulation von Sturzfluten zu verbessern.

Die Entstehung einer Sturzflut durch Starkregen hängt, wie hier schon mehrmals beschrieben, direkt damit zusammen, dass die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität des Bodens überschreitet. Dadurch werden die Infiltrationsprozesse und die damit zusammenhängenden Einflussfaktoren von zentraler Bedeutung für die Entstehung von Sturzfluten. Daher ist es wichtig, diesen Aspekt möglichst detailliert abzubilden um eine mögliche zukünftige Sturzflutwarnung vorzubereiten.

Aus diesem Grund, wurde nun neben der üblicherweise berücksichtigten Infiltration über die Bodenmatrix auch die Infiltration über Makroporen und ggf. über Trockenrisse mit einbezogen. Dementsprechend, wurden die Bodenparameter in LARSIM aktualisiert und um viele Parameter mit Hilfe des Services Pedologiques der ASTA erweitert.

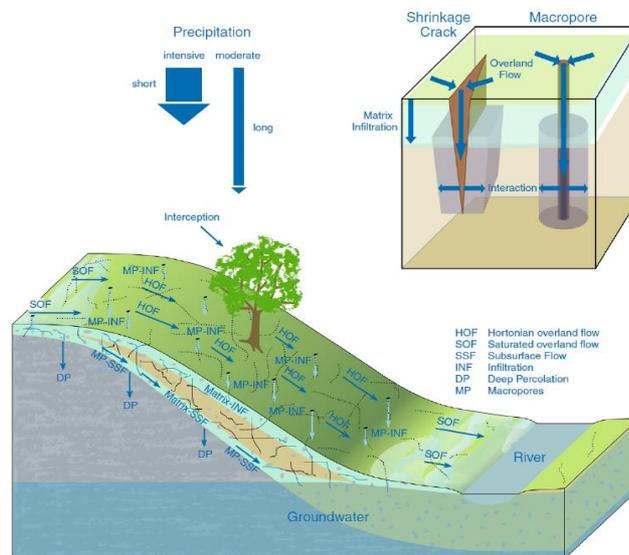


Abbildung 46: Abflussbildungsprozesse nach Steinbrich et al. (2016)

Dieses „Update“ vom Hochwasservorhersagemodell LARSIM stellt demnach eine Integration des dynamischen Infiltrationsmoduls RoGeR dar, welches an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg entwickelt wurde (siehe Steinbrich et al., 2016), um die prozessnahe Simulation vom Infiltrationsüberschuss besser im Modell darstellen zu können.

Überschreitet die aktuelle Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität so schaltet sich das dynamische Infiltrationsmodul ein und ist dabei dem Bodenmodul vorgeschaltet. Das dynamische Infiltrationsmodul ermöglicht eine genaue Simulation des Prozesses der überschüssigen Infiltration und folglich des Horton-Oberflächenabflusses (HOF) während starker Regenfälle. Es wird dabei berücksichtigt, dass die Infiltrationsrate vom aktuellen Zustand des Oberbodens (Bodenfeuchte zu Beginn des Ereignisses) und von den Veränderungen innerhalb eines Niederschlagsereignisses abhängt, d.h. zeitlich dynamisch ist. Im ersten Schritt wird die vertikale Infiltration auf der Bodenmatrix mit dem Green-Ampt-Ansatz berechnet. Wenn nicht das gesamte Wasser eines Zeitschrittes durch die Bodenmatrix infiltrieren kann, gelangt ein Teil des überschüssigen Wassers in die Makroporen und ggf. in die Trockenrisse. Die horizontale Infiltration aus Makroporen und Trockenrisse in die Bodenmatrix wird ebenfalls mit dem Green-Ampt-Ansatz berechnet. Zusätzlich werden die Wechselwirkungen zwischen den Sickerfronten der drei Teilprozesse berücksichtigt. Sofern nach Berücksichtigung der Teilprozesse Matrix-, Makroporen- und Trockenriss-Infiltration noch nicht das gesamte Wasserdargebot infiltrieren konnte, resultiert ein Infiltrationsüberschuss und in der Folge HOF.

Insbesondere auf Ackerflächen kann die Verschlämmung auch die maximale Infiltrationsrate des Bodens verringern und damit zu einem erhöhten Oberflächenabfluss führen. In LARSIM kann die Verschlämmung bei der Versickerungsberechnung berücksichtigt werden. Dazu muss die Verschlämmungstendenz des Bodens auf Unterteilungsebene (bodenspezifisch) angegeben werden, ergänzt durch jahreszeitspezifische Angaben zum Verschlämmungsgrad (monatsabhängig, je nach Bodenmanagement).

Darüber hinaus werden in LARSIM weitere für die Abflussbildung wichtige Oberflächenprozesse und -eigenschaften abgebildet, wie z. B. die Interzeption oder der Grad der Vernässung. Letzteres ist besonders wichtig für die Entstehung von Oberflächenabfluss in städtischen Gebieten und damit für das Risiko von Sturzfluten. LARSIM bietet die Möglichkeit, die räumlichen Daten des Staunässegrades detailliert im Modell zu berücksichtigen und bei Bedarf kontinuierlich zu aktualisieren.

Das Projekt „Kritische Regenfälle Luxemburgs“

Im Projekt "Kritische Regenfälle Luxemburgs" (2020-2022) des Wasserwirtschaftsamts in Zusammenarbeit mit MeteoLux, werden nicht die vorhergesagten Niederschläge als Ausgangspunkt für die hydrologische Simulation genommen, sondern Überschwemmungen an kritischen Punkten und dann bestimmt, welche Niederschlagsintensität ("kritische Niederschlagsschwellen") sie ausgelöst haben. Bei dieser „Sturzflut-Warnung“ mit einem Flash-Flood-Guidance Ansatz, geht es darum, die bei der Vorhersage erwähnten technischen Probleme zu umgehen und ohne operativen Simulationsaufwand zu wissen, welche Einzugsgebiete (aufgrund von Topographie, Bebauung, Landmanagement usw.) besonders anfällig für Sturzfluten sind. Erreicht ein Sturmpotenzial eine bestimmte kritische Niederschlagsintensität für eine Region, kann das Hochwasserpotenzial im Katalog mit den kritischen Niederschlagsschwellen pro Einzugsgebiet nachgeschlagen werden, um eine Warnung vor dem Sturzflutrisiko für dieses Einzugsgebiet zu geben. Dadurch werden Starkregenwarnungen gezielter und die räumliche Auflösung der Warnungen erhöht.

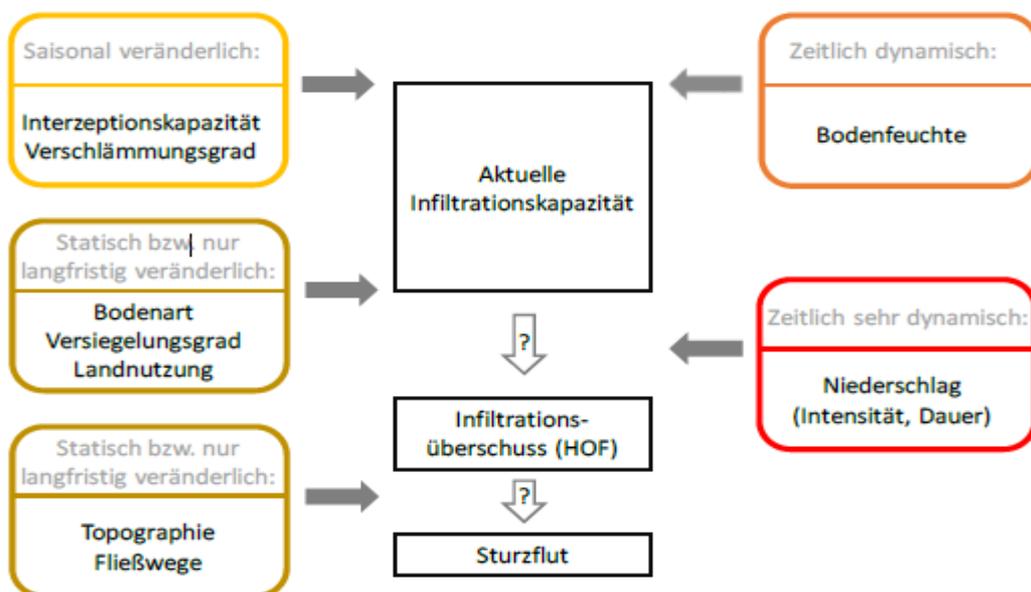


Abbildung 47: Schematische Darstellung der Faktoren, die für die Entstehung einer Sturzflut maßgeblich sind. (Hydron, 2020)

Da wir uns eindeutig in einem Bereich der Überschneidung von hydrologischen und meteorologischen Vorhersagen befinden, da Sturzfluten das Ergebnis einer Verkettung von meteorologischen und hydrologischen Umständen sind, wird dieses Projekt in technischer und finanzieller Zusammenarbeit mit der meteorologischen Abteilung der Luftfahrtsverwaltung (MeteoLux, Administration de la Navigation aérienne) durchgeführt, um ein Leitsystem für Sturzfluten zu entwickeln.

Eine Matrix der Flächenreaktion auf den Niederschlagseintrag (Dauer und Intensität) und die Vorfeuchte des Bodens (+ saisonale Verschlämmung und ggf. Interzeptionskapazität) soll für jedes Warngbiet auf der Grundlage zahlreicher Szenarioberechnungen erstellt werden.

Gleichzeitig werden die kritischen Gefahrenbereiche pro Warngbiet auf Basis der vorliegenden Starkniederschlagsgefahrenkarten (SRGK) ermittelt. Aus der Synthese der Gebietsantworten und der kritischen Gefahrenbereiche (Risiken) können pro Warngbiet geeignete Abflussschwellenwerte für die Sturzflutwarnung extrahiert werden.

Basierend auf der Flächenreaktionsmatrix werden die Abflussschwellenwerte in kritische Niederschlagsschwellenwerte umgewandelt (basierend auf Dauer und Bodenvorfeuchte). Diese Matrix der kritischen Niederschlagsschwellen pro Warngbiet ist die zentrale Grundlage für die operative Sturzflutwarnung. Weitere Eingangsgrößen für die operationelle Sturzflutwarnung sind die aktuelle Bodenfeuchte sowie der aktuellen und kurzfristigen Niederschlagsvorhersage aus Radarprodukten (Now-casting). Dabei kann die Bodenfeuchte z.B. einmal am Tag aktualisiert werden, während der Niederschlag in kritischen Zeiträumen wesentlich häufiger (z.B. stündlich) bereitgestellt werden kann. Basierend auf der Vorfeuchte und dem Niederschlag wird anhand der kritischen Niederschlagsschwellenmatrix geprüft, ob ein Schwellenwert überschritten wurde. Ist dies der Fall, wird eine entsprechende Warnung für den betroffenen Bereich ausgegeben.

5 Schlussfolgerung

Um auf die zukünftigen Klimawandelrisiken vorbereitet zu sein, ist es erforderlich die Herausforderungen der Adaptation an diesen Wandel anzugehen. Dies ist eine gesellschaftliche Aufgabe, deren Erfolg mit Offenheit, Kompromissbereitschaft und Koproduktion von Wissen zu meistern ist. Eine singular korrekt Antwort auf alle Herausforderungen gibt es eben so wenig wie die so oft gewünschte einfache und schnelle Lösung. Weiterhin gibt es kein spezifisches institutionelles Modell das alle wasserbezogenen Probleme lösen könnte. Daher bedarf es einem Wandel der Herangehensweise an Probleme: Von kurzfristig gedachten Lösungen zu nachhaltigen, integralen und zielorientiertem Risikomanagement. Dies erfordert jedoch eine den zukünftigen Generationen solidarische Sichtweise auf die gesellschaftliche Entwicklung und den politischen Willen zum gesellschaftlichen Wandel in die nachhaltige Entwicklung.

Hierzu steht im Bericht der Weltbank zu Flussgebietsmanagement:

Es gibt keine magische Lösung oder den einzig richtigen Weg, um den richtigen Grad oder das richtige Maß an Integration zu erreichen, noch gibt es ein bestimmtes institutionelles Modell, das auf alle Fälle anwendbar ist. Erforderlich ist ein Wandel in der Art und Weise, wie Einzelpersonen und Behörden über ihre wasserbezogenen Aktivitäten denken.¹⁰ (The World Bank, 2006)

Die Antwort auf die krisenhaften Veränderungen der Erde durch den Klimawandel kann im verantwortbaren Risikomanagement nur in der Nachhaltigkeit liegen. Technokratische Maßnahmen zum Erhalt von nicht-nachhaltigem Umgang mit Oberflächenwasser (z.B. Schutzbauten für neue, nicht wassersensible Bebauung) dürfen nicht die Antwort sein. Es geht um Vorsorge, Minderung und Anpassung, erhebliche technische Lösungen sollten immer nur die Notfalloption darstellen. Dieser Wandel ist daher weniger eine technische Aufgabe, sondern eher die gesellschaftliche Herausforderung einen Paradigmenwechsel zu schaffen. Die Wasserverwaltung, als dem Gemeinwohl verpflichtete öffentlich-rechtliche Verwaltung, setzt hier wesentliche Beiträge zur Entwicklung und Umsetzung von nachhaltigen Risikomanagementstrategien. Durch eigene unabhängige Expertisen, ihrer zentralen Verantwortlichkeit und der regionalen Präsenz durch ist es ihre äußerst komplexe Aufgabe die verschiedensten gesellschaftlichen Interessen durch einen integrativen Ansatz im Starkregenerisikomanagement zu garantieren. Es bleibt dabei, sich auch weiter für einen nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser einzusetzen und aufzuklären, dass Schutzmaßnahmen keine absolute Sicherheit gewährleisten können und Überflutungen nicht um jeden Preis verhindert werden können, sondern deren Schadwirkung minimiert werden muss.

¹⁰ Übersetzt aus dem Englischen

6 Ausblick

In diesem Sinne lassen sich auch noch einige Aufgaben ableiten, die in Zukunft bewältigt werden müssen um das Starkregenrisiko in Luxemburg weiter zu mindern.

Demnach gibt es ein Problem der Begrifflichkeit und so wird Starkregen oft interdisziplinär in seinem Begriffsverständnis unterschiedlich benutzt. Dies kann zu Verständigungsproblemen führen und auch der Vergleichbarkeit von Ereignissen im Wege stehen. So gibt es Begriffe wie zum Beispiel Sturzflut, Starkregen, Flashflood, urbane Überschwemmungen oder pluviale Überschwemmung die in der Wissenschaft geklärt und voneinander getrennt definiert werden müssten.

Wie dieser Bericht zeigt, hat das Starkregenrisiko in den letzten Jahren, durch die wiederholten Ereignisse, zunehmend an Aufmerksamkeit erlangt. Es bleibt jedoch wichtig, die Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung weiter zu stärken (Umweltbundesamt, 2018). Es ist hierbei notwendig, den Unterschied zwischen Flusshochwasser und Starkregen zu erklären, auch wenn dies einem integralen Ansatz des Risikomanagements nicht im Wege stehen darf. Es muss jedoch deutlich gemacht werden, dass die Überflutung durch Starkregen auch abseits von den bekannten Risikogewässern entstehen und zu hohem Schaden führen kann. Weiterhin, besteht die fortwährende Aufgabe die kurzen Vorwarnzeiten und die sehr unsicheren Prognosen zu erklären. Zudem muss kontinuierlich auf die Grenzen des technischen Überflutungsschutzes, speziell im nicht-stationären Zeitalter des Klimawandels, hingewiesen werden. Daher muss auch in Zukunft stets sehr klar kommuniziert werden, dass auch bei Umsetzung aller technischen Maßnahmen, ein Restrisiko immer bestehen bleiben wird.

Nicht nur in der Bevölkerung muss das Bewusstsein geschaffen werden, sondern auch in der Bebauungsplanung soll das Thema weiter aktiviert werden (Umweltbundesamt, 2018). Modernes, nachhaltiges und barrierefreies Bauen ist mit überflutungssicherem Bauen zu koordinieren. Dies könnte über erklärende Leitfäden, Best-Practice-Beispielen oder auch der Sensibilisierung in den entsprechenden Ausbildungen vollbracht werden.

Weiterhin müssen die Bemühungen der systematischen Erfassung der Ausmaße und der Schäden von Starkregenereignissen weitergeführt und ausgebaut werden. Auch in Luxemburg, soll nach dem Vorbild anderer Länder oder in Kooperation mit anderen Ländern, eine Datenbank zur Dokumentation von (Hochwasser-&) Starkregenereignissen erstellt werden. Auch für die erstellten Starkregengefahrenkarten wäre eine stärkere Dokumentation von Ereignissen und ihres Ausmaßes hilfreich um die Oberflächenabflussmodelle zu validieren (Umweltbundesamt, 2018).

Bei der Erstellung der Starkregengefahrenkarten besteht die Schwierigkeit signifikante Risikogebiete abzugrenzen da Starkregen überall und unabhängig vom Gewässer vorkommen kann. Hier können moderne Visualisierungsmethoden helfen. So besteht zum Beispiel zukünftig die Möglichkeit einer dynamischen Visualisierung des Abflussgeschehens sowie die 3D-Darstellung der Überflutungstiefe in der „Punktwolke“ des digitalen Geländemodells zu programmieren.

Eine große Herausforderung im Starkregenrisikomanagement sind die fehlenden Warnsysteme. Neben verschiedenen Maßnahmen zu Reduktion des Risikos, ist auch die Warnung sehr relevant für eine erfolgreiche Risikoreduktion. Vorhersage- und Vorwarnzeiten sind jedoch sehr viel kürzer als bei Flusshochwasser (Umweltbundesamt, 2018). Es bleibt kaum Zeit für Rettungsdienste auf die vorhergesagten Ereignisse zu reagieren. Es besteht die Wahrscheinlichkeit, dass auch in Zukunft durch die chaotischen Dynamiken in der Atmosphäre, lange Vorwarnzeiten nicht erreicht werden können (Umweltbundesamt, 2018). Die Notwendigkeit einer fachlichen und technischen Weiterentwicklung der Warnungen und Vorwarnzeiten ist jedoch weiterhin notwendig, siehe Das Projekt „Kritische Regenfälle Luxemburg“.

Ein integrales Starkregenrisikomanagement braucht eine gute Kooperation. So sollten in den kommunalen Maßnahmenkonzepten auch kommunale Kooperationen auf Ebene der Einzugsgebiete, wie bereits an der weißen Ernz umgesetzt, gefördert werden. Zudem bedarf es einer guten Kooperation unter allen Verwaltungen.

Schlussendlich müssen die Bemühung aufrechterhalten werden, die Wissenslücken im Bereich Starkregen zu schließen und Unsicherheiten zu verringern. Um Starkregenrisikomanagement in Luxemburg zu verbessern, sollte diese Unsicherheiten in Zukunft gezielt in Forschungsprojekten adressiert werden. Folgend muss auch die Wirksamkeit der Maßnahmenkonzepte in Zukunft evaluiert und stetig verbessert werden.

7 Bibliografie

- Ahlhelm, I., Frerichs, S., Hinzen, A., Noky, B., Simon, A., Riegel, C., . . . Rubel, C. (2016). *Klimaanpassung in der räumlichen Planung (Praxishilfe), Starkregen, Hochwasser, Massenbewegungen, Hitze, Dürre*. Umweltbundesamt. Récupéré sur <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaanpassung-in-der-raeumlichen-planung>
- Ai Milojevic, B. A. (2017). Mental health impacts of flooding: a controlled interrupted time series analysis of prescribing data in England. *Epidemiol Community Health*.
- Akademie für Raumforschung und Landesplanung. (2013). *Glossar: Klimawandel und Raumentwicklung*. Hannover.
- Ana Fernandez, J. B. (2015). Flooding and Mental Health: A Systematic Mapping Review. *PloSone*.
- Archer, D. R., & Fowler, H. (2015). Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain. *Flood Risk Management*, 121-133.
- BBSR. (2019). *Leitfaden Starkregen – Objektschutz und bauliche Vorsorge*. Bonn.
- Becker, P. B. (2016). *Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland. Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung*. Deutscher Wetterdienst.
- Böhle, F., Pfeiffer, S., & Sevsay-Tegethoff, N. (2004). *Die Bewältigung des Unplanbaren*. Wiesbaden: Springer.
- Brundtland Commission. (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.
- Brune, M. B. (2017). *Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung*. Hamburg: Climate Service Center Germany.
- Bueche, K., Buschlinger, M. (2021). *Erstellung eines Starkregenatlas für das Großherzogtum Luxemburg*.

- CIS working group ECOSTAT. (2020, 02 17). Guidance No 37 - Mitigation Measures Library.xls. Récupéré sur <https://circabc.europa.eu/ui/group/9ab5926d-bed4-4322-9aa7-9964bbe8312d/library/67f969f9-5abe-4765-a952-2f8e2bf5b664/details>
- Der Deutsche Wetterdienst. (2020, 07 09). *Warnungen*. Récupéré sur Warnkriterien: https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html
- Der Deutsche Wetterdienst. (2020, 07 09). *Wetterlexikon*. Récupéré sur Starkregen: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html>
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, A. u. (2018). *Merkblatt DWA-M 910 - Berücksichtigung der Bodenerosion bei der Maßnahmenplanung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie*. DWA.
- Estupina-Borrell, V., Dartus, D., & Ababou, R. (2006). Flash flood modeling with the MARINE hydrological distributed model . *Hydrology and Earth System Sciences*, 3397–3438.
- Geomer gmbh, EEPI s.a.r.l. (2021). *Erstellung eines Starkregenatlas für das Großherzogtum Luxembourg - Abschlussbericht*.
- Gerald North; John Pyle; Fuqing Zhang. (2014). *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Environ Sci & Pollut Res. doi:10.1007/BF02987594
- Grambow, M. (2013). *Nachhaltige Wasserbewirtschaftung Konzept und Umsetzung eines vernünftigen Umgangs mit dem Gemeingut Wasse*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- IPCC. (2018). *Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization,.
- JASPERS Networking and Competence Centre. (2018, 07 20). Water Framework Directive - Jaspers assessment checklist tool. Récupéré sur <http://www.jaspersnetwork.org/plugins/servlet/documentRepository/displayDocumentDetails?documentId=441>

- MDDI; Département de l'aménagement du territoire. (2012). *Anpassung an den Klimawandel – Strategien für die Raumplanung in Luxemburg*. Luxemburg.
- MeteoLux. (2020, 07 20). *Wetterwarnungen*. Récupéré sur meteorologische Gefahren: <https://www.meteolux.lu/de/wetterwarnungen/meteorologische-gefahren/?lang=fr>
- Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et de la Protection des consommateurs . (2018, 06 13). *Nouveau record de précipitation enregistré à Waldbillig*. Récupéré sur https://gouvernement.lu/fr/actualites/agenda.gouvernement%2Bfr%2Bactualites%2Btoutes_actualites%2Bcommuniqués%2B2018%2B06-juin%2B13-precipitation.html
- Ministerium für ein lebenswertes Österreich. (2017). *Leitfaden Gewässerentwicklungs- und Risikomanagementkonzepte*. Wien: BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT.
- Montz, B. E., & Grunfest, E. (2002). Flash flood mitigation: recommendations for research and applications. *Environmental Hazards*, 15-22.
- Müller, C., Nied, M., Voigt, M., Sauer, T., Junghänel, T., & Hübener, H. (2019). *Starkniederschläge, Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft, Kurzbericht*. Kooperationsvorhabens KLIWA – Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Récupéré sur https://www.kliwa.de/_download/KLIWA-Kurzbericht_Starkregen.pdf
- Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT. (2021, 06 18). *Warum braucht es ein integrales Risikomanagement?* Récupéré sur <https://www.planat.ch/de/fachleute/risikomanagement>
- Neuhold, C. (2016). *EU Floods Directive implementation in Austria*. FLOODrisk 2016 - 3rd European Conference on Flood Risk Management.
- Nissen, K. M., & Ulbrich, U. (2017). Increasing frequencies and changing characteristics of heavy precipitation events threatening infrastructure in Europe under climate change. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 1177-1190. doi:10.5194/nhess-17-1177-2017
- Rainman-Project - Interreg. (2021, 06 15). *Risikobewertung und Kartierung - Informationen für Experten*. Récupéré sur Rainman-toolbox: <https://rainman-toolbox.eu/de/home-de/werkzeuge-methoden/risikobewertung-kartierung/experten/>

- Ridolfi, E., Di Francesco, S., Pandolfo, C., Berni, N., Biscarini, C., & Manciola, P. (2019). Coping with Extreme Events: Effect of Different Reservoir Operation Strategies on Flood Inundation Maps. *Water*, 982.
- Roux, H. L.-A.-M. (2011). A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2567–2582.
- Schmitt, K. P. (2018). Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*.
- Schmitt, T. G. (2015). Weiterentwicklung des Starkregenindex zur Verwendung in der kommunalen Überflutungsvorsorge. *gwf - Wasser/Abwasser*.
- Sene, K. (2013). *Flash Floods Forecasting and Warning*. Dordrecht : Springer Netherlands. doi:9789400751644
- Stefanovic, I. L. (2003). The Contribution of Philosophy to Hazards Assessment and Decision Making. *Natural Hazards*, 229-247.
- The World Bank. (2006). *Integrated river basin management, From Concepts to Good Practice*. Washington D.C.: The World Bank. Récupéré sur <http://documents1.worldbank.org/curated/en/965371468340137430/pdf/411500Intro0to1mgmt0NOTE1101PUBLIC1.pdf>
- Umweltbundesamt. (2018). *Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs*. Dessau-Roßlau.
- UN/ISDR. (2005). Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters. *World Conference on Disaster Reduction*, (p. 20). Kobe, Hyogo, Japan.
- WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH. (2018). *Land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen zur Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Kommunen*. Karlsruhe: WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH.